

Otimização dos Custos Operacionais de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha

*Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica*

Autor

Nuno Miguel de Oliveira Salvador

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Orientador

António Manuel de Morais Grade

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Supervisor do Estágio

Fernando Mário Coelho Vitorino

CMP- Cimentos Maceira e Pataias

Coimbra, dezembro 2015

Ao meu Pai

AGRADECIMENTOS

Todo o trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e colaboração de algumas pessoas, pelo que guardo esta página para lhes agradecer.

Em primeiro lugar, agradecer aos meus pais por me terem proporcionado a hipótese de me formar academicamente e todo apoio e incentivo incondicionais que me concederam na perseguição deste objetivo.

Seguidamente, agradecer à CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A. pela possibilidade da realização do estágio, com um especial agradecimento ao meu supervisor de estágio Eng. Fernando Vitorino, ao Eng. Nuno Serens e aos funcionários André Ferreira, Eduardo Gonçalves, Fernando Luz e Jorge Vareda. A todos eles um muito obrigado pela ajuda e apoio prestados e pelos conhecimentos transmitidos. Agradecer ainda a toda a família CMP a forma como me receberam e o apoio e ajuda concedidos.

Ao meu professor orientador António Grade, pela disponibilidade, ajuda e conhecimentos transmitidos ao longo do meu percurso académico, quer na Licenciatura quer agora no Mestrado.

A todos os professores com quem tive o prazer e o privilégio de contactar ao longo do meu período de estudos no ensino superior, por todos os conhecimentos e ensinamentos transmitidos.

Por último, mas não menos importante, a todos os meus restantes familiares e aos meus amigos, com especial atenção para aqueles com quem mais confraternizei durante o meu percurso no ensino superior, sabendo eles quem são, e que me incentivaram e me acompanharam nesta jornada.

A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

Dada a dimensão de uma fábrica de cimento, com uma enorme variedade e quantidade de equipamentos, a probabilidade da ocorrência de uma falha ou avaria num deles é relativamente elevada.

Assim, este trabalho teve como objetivo fazer um estudo de possíveis alternativas para a otimização do funcionamento do arrefecedor de clínquer de grelha presente na fábrica de cimento Maceira-Liz, quer a nível energético quer a nível de manutenção, uma vez que o equipamento em questão peca em ambas as áreas tendo falhas regulares em serviço, provocando deste modo perdas significativas na produção. Também os tempos e os custos de reparação deste equipamento são usualmente elevados, e quando associados ao tempo que demora a repor o processo, agravam ainda mais as perdas na produção.

Ao nível da manutenção foram analisados dois dos problemas identificados e que se prendiam com a elevada frequência de substituição de placas para as grelhas dos arrefecedores de clínquer e com a redução do tempo de serviço das correias aplicadas nos ventiladores de insuflação de ar de arrefecimento do mesmo aparelho.

A nível de energia, foi realizado um balanço energético ao equipamento com a intenção de posteriormente desenvolver uma ou várias soluções de melhoria com base na informação recolhida.

Por fim, destacam-se ainda alguns trabalhos desenvolvidos pelo aluno para além dos que foram realizados no âmbito do tema do estágio e a sua importância. Estes trabalhos acrescentaram experiência, conhecimentos e prática ao aluno, que se poderão revelar importantes ferramentas para a transição da vida académica para a vida laboral.

Palavras-chave: Cimento, Otimização, Arrefecedor de Clínquer, Manutenção, Balanço Energético.

ABSTRACT

Given the size of a cement plant, with a huge variety and number of equipments, the probability of failure or malfunction is relatively high.

Therefore, the development of this dissertation was aimed at the study of possible alternative ways to optimize the operating process of the grate clinker coolers at Maceira-Liz cement plant. This optimization was intended both at a maintenance level as well as at an energy level, since the mentioned equipment has handicaps in both areas.

At the maintenance level, there were two identified problems that were analyzed. These problems concerned the high rate at which the clinker cooler grate plates were being replaced and the reduction of service life of the belts used on the clinker coolers cooling fans.

On the energy side, it was carried out an energy balance of the clinker cooler, the purpose being the development of improvement solutions based on the collected information.

Finally, it is reported some of the work done by the student beyond what was defined in the internship program, and its importance. These tasks increased the experience, knowledge, and practice acquired by the student, which can be very important advantages for the transition from the academic life to the real working life.

Keywords: Cement, Optimization, Clinker Cooler, Maintenance, Energy Balance.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Enquadramento do Tema Escolhido	1
1.2.	Objetivos a Alcançar	2
1.3.	Estrutura do Relatório	3
2.	INDUSTRIA CIMENTEIRA.....	5
2.1.	O Cimento	5
2.1.1.	História do Cimento	5
2.2.	Industria Cimenteira em Portugal	6
2.2.1.	Secil e CMP	7
2.2.1.1	Maceira-Liz	8
3.	PROCESSO DE FABRICO	11
3.1.	Extração das Matérias-Primas.....	11
3.2.	Preparação das Matérias-Primas	12
3.2.1.	Transporte, Armazenamento e Pré-Homogeneização	12
3.2.2.	Moagem, Homogeneização e Armazenamento de Cru	13
3.3.	Cozedura	14
3.4.	Moagem de Cimento	17
3.5.	Embalagem e Expedição	19
4.	ARREFECADOR DE CLÍNQUER.....	21
4.1.	Tipos de Arrefecedores de Clínquer	22
4.1.1.	Arrefecedor de Clínquer Planetário ou de Satélites	23
4.1.2.	Arrefecedor de Clínquer Rotativo.....	24
4.1.3.	Arrefecedor de Clínquer de Grelha.....	26
4.1.3.1	Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração	27
4.1.3.2	Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 2ª Geração	30
4.1.3.3	Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 3ª Geração	32
4.2.	Arrefecedores de Clínquer em Maceira-Liz	34
4.2.1.	Constituição das Grelhas do Arrefecedor de Clínquer	41
5.	IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS	45

6.	REDUÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS DO ARREFECADOR DE CLÍNQUER.....	49
6.1.	Transmissão por Correias dos Ventiladores do Arrefecedor de Clínquer	49
6.1.1.	Verificação da Transmissão por Correias Existente.....	49
6.1.1.1	Ventilador 1	54
6.1.1.2	Ventilador 2	58
6.1.1.3	Ventilador 3	60
6.1.1.4	Ventilador 4	62
6.1.1.5	Ventilador 5	64
6.1.1.6	Ilações Retiradas.....	66
6.1.2.	Otimização da Transmissão por Correias	67
6.1.2.1	Ventilador 1	67
6.1.2.2	Ventilador 3	70
6.1.2.3	Ventilador 5	73
6.1.2.4	Proposta Final.....	77
6.2.	Otimização das Placas das Grelhas do Arrefecedor de Clínquer	82
6.2.1.	Análise da Influência da Composição Química das Placas na sua Elevada Taxa de Substituição	82
6.2.2.	Estudo da Influência da Afição dos Queimadores na Anormal Taxa de Substituição de Placas.....	83
6.2.3.	Controlo e Monitorização da Substituição de Placas nas Grelhas	87
6.2.4.	Otimização das Placas	89
6.2.4.1	Estudo da Placa Lateral Esquerda Utilizada	91
6.2.4.2	Estudo da Placa Lateral Esquerda Otimizada	99
6.2.4.3	Comparação de Resultados.....	108
6.3.	Processo de Arrefecimento do Clínquer por Injeção de Água.....	111
6.3.1.	Dimensionamento e Cálculo dos Custos de Implementação do Sistema de Injeção de Água	118
7.	OUTROS TRABALHOS REALIZADOS	125
8.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	131
8.1.	Conclusões	131
8.2.	Propostas de Desenvolvimentos Futuros	133
	BIBLIOGRAFIA.....	135
	ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fábrica Maceira-Liz	9
Figura 2 - Museu da Fábrica Maceira-Liz	10
Figura 3 - Pedreira de Calcário	11
Figura 4 - Hangar da Pré-Homogeneização	12
Figura 5 – Pente que faz a Mistura das Matérias-Primas	13
Figura 6 - Moinho de Cru	13
Figura 7 - Moinho de "Filler"	14
Figura 8 - Torre de Ciclones	15
Figura 9 - Forno Horizontal Rotativo	15
Figura 10 - Em Cima, à Esquerda o Parque de Pneus e à Direita os PCA. Em Baixo, à esquerda o Silo do Petróleo de Coque e à Direita um Moinho de Petróleo de Coque	16
Figura 11 - Arrefecedor de Clínquer	17
Figura 12 - Prensa de Rolos	18
Figura 13 - Moinho de Cimento	19
Figura 14 - Da esquerda para a Direita: Paletes de Sacos de Cimento, Paletes de Sacos de Cimento Plastificadas e Pacotões	20
Figura 15 - Arrefecedor de Clínquer de Satélites [41]	23
Figura 16 - Forno Horizontal Rotativo e Arrefecedor de Clínquer Rotativo [29]	25
Figura 17 - "Red River" [21]	26
Figura 18 - "Snowman" [21]	27
Figura 19 - Esquema Simplificado de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração [5]	28
Figura 20 - Passagem do Ar de Arrefecimento pela Camada de Clínquer [20]	29
Figura 21 - Esquema Simplificado de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 2ª Geração [5]	30
Figura 22 - Arrefecedor de Clínquer Cross-Bar™ [7]	32
Figura 23 - Sistema de Regulação de Passagem de Ar utilizado no Arrefecedor Cross-Bar™ [7]	33
Figura 24 – Representação do Movimento das Barras no Arrefecedor Cross-Bar™ [7]	34
Figura 25 - Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração Instalado na Fábrica Maceira-Liz	35
Figura 26 - Altar do Arrefecedor de Clínquer Instalado em Maceira-Liz	35
Figura 27 - À esquerda, a Estrutura do Movimento das Grelhas e os Rodízios que a guiam. À direita, está o Mecanismo que Confere o Movimento à Estrutura representada na Imagem à Esquerda.	36
Figura 28 - Compartimento de Insuflação de Ar de Arrefecimento	36
Figura 29 - À Esquerda está a Cortina de Correntes e à Direita o Britador do Arrefecedor de Clínquer	38

Figura 30 - Primeira Grelha do Arrefecedor de Clínquer de Maceira-Liz	39
Figura 31 - À Esquerda, as Tremonhas de Decantação à Saída do Arrefecedor e à Direita, a Caldeira do Sistema de Climatização	40
Figura 32 - À Esquerda, o Permutador de Calor Ar-Ar e à Direita, o Filtro de Mangas, o Ventilador da Chaminé e a Chaminé	40
Figura 33 - Layout da Disposição das Placas nas Grelhas do Arrefecedor	41
Figura 34 - Fixação das Placas aos seus Suportes.....	43
Figura 35 - À Esquerda, dois dos Ventiladores do Arrefecedor e à Direita, a Degradação das Correias Substituídas	45
Figura 36 - Placas do Arrefecedor Substituídas	46
Figura 37 - Exemplos de Fraturas numa Placa Substituída	47
Figura 38 - Curva Característica do Ventilador 1	81
Figura 39 - Curva Característica do Ventilador 3	81
Figura 40 - Analisador de Liga NITON XLt	83
Figura 41 - Consumo de Placas nos Arrefecedores 7 e 8 antes e depois da Afinação dos Queimadores	84
Figura 42 - Diferença no Consumo de Placas antes e depois da Afinação dos Queimadores	84
Figura 43 - Rácio Global entre a Produção de Clínquer e o Consumo de Placas	85
Figura 44 - Diferença no Consumo de Placas por Arrefecedor antes e depois da Afinação dos Queimadores	86
Figura 45 - Rácios por Arrefecedor de Clínquer entre a Produção de Clínquer e o Consumo de Placas	87
Figura 46 – Separador “Consulta_gasto_tempo” do ficheiro Excel desenvolvido.	89
Figura 47 - Modelo da Placa Lateral Esquerda Desenhado em SOLIDWORKS	90
Figura 48 - Parâmetros Definidos no SOLIDWORKS para o Material Utilizado nas Placas	91
Figura 49 – Montagem do Modelo Desenhado da Placa com o Pino de Fixação.....	91
Figura 50 - Apoios e Fixações da Placa	92
Figura 51 - Aplicação da Força de 900 N na Placa	93
Figura 52 – Aplicação dos Apoios e Fixações da Placa Estabelecidos	94
Figura 53 - Aplicação das Cargas Térmicas na Placa	94
Figura 54 - Estabelecimento de Contacto entre as Peças	95
Figura 55 - Malha Utilizada no Ensaio.....	95
Figura 56 - Propriedades da Malha Utilizada no Ensaio	96
Figura 57 - Ensaio de Carga Mecânica Estática	97
Figura 58 - Resultados do Ensaio Estático com a Aplicação de todas as Cargas	98
Figura 59 - Zonas de Fratura de algumas Placas	99
Figura 60 - Modelo da Placa Proposta para Substituição Desenhado em SOLIDWORKS	100
Figura 61 - Alterações Realizadas na Zona Frontal Interior da Placa	100
Figura 62 - Exemplos de Fraturas Junto ao Apoio de Fixação da Placa	101
Figura 63 - Comparação entre os Apoios de Fixação da Placa Utilizada e da Proposta.....	101

Figura 64 - Placas Fraturadas Substituídas	102
Figura 65 - Apoio de Fixação da Placa Proposta Completo	102
Figura 66 - Montagem da Placa Proposta com o Pino de Fixação.....	103
Figura 67 - Fixações Aplicadas à Montagem da Placa Proposta	103
Figura 68 - Cargas Aplicadas à Montagem da Placa Proposta	104
Figura 69 - Estabelecimento do Contacto entre as duas Peças da Montagem	104
Figura 70 - Malha Utilizada no Ensaio da Montagem da Placa Proposta e as suas Características	105
Figura 71 - Resultado do Ensaio Estático Realizado à Montagem da Placa Proposta só com a Força de 900 N Aplicada	106
Figura 72 - Resultados do Ensaio Estático Realizado à Montagem da Placa Proposta com todas as cargas aplicadas.	107
Figura 73 - Comparação dos Resultados Obtidos para Ambas as Placas na sua Zona Superior	108
Figura 74 – Comparação dos Resultados Obtidos para Ambas as Placas na sua Zona Inferior	109
Figura 75 - Comparação dos Resultados Obtidos para Ambas as Placas na Zona do Apoio de Fixação e dos Furos	110
Figura 76 – Esquema das Entradas e Saídas do Arrefecedor de Clínquer.....	112
Figura 77 - Medições Efetuadas Localmente para o Balanço Energético	112
Figura 78 – Distribuição da Energia Calorífica Arrefecedor.....	117
Figura 79 - Substituição das Virolas do Forno	125
Figura 80 - Processo de Soldadura Realizado nas Virolas e Confirmação da Soldadura por Ultrassons	126
Figura 81 - Resultado Final da Substituição das Virolas do Forno.....	126
Figura 82 - Alinhamento do Forno da Linha 5	127
Figura 83 – Intervenção no Altar do Arrefecedor de Clínquer da Linha 5.....	128
Figura 84 - Altar do Arrefecedor da Linha 5 depois da Intervenção	128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Cimento feitos em Maceira-Liz.....	19
Tabela 2 - Características dos Ventiladores do Arrefecedor de Clínquer	37
Tabela 3 – Tipos de Placas Utilizadas nas Grelhas do Arrefecedor de Clínquer.....	42
Tabela 4 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 1	54
Tabela 5 - Fatores para o Cálculo do N° de Correias para uma Vida de 25000 horas	56
Tabela 6 - Fatores para o Cálculo do N° de Correias para uma Vida de 12000 horas	56
Tabela 7 – Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 2	58
Tabela 8 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 2.....	59
Tabela 9 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 3	60
Tabela 10 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 3.....	61
Tabela 11 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 4	62
Tabela 12 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 4.....	63
Tabela 13 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 1	64
Tabela 14 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 5.....	65
Tabela 15 – Comparação entre o que está Instalado no Local e os Resultados das Seleções de Verificação	66
Tabela 16 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 1	68
Tabela 17 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 1	69
Tabela 18 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização.....	70
Tabela 19 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 3	71
Tabela 20 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 3	72
Tabela 21 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização.....	73
Tabela 22 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 5	74
Tabela 23 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 5	75
Tabela 24 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização.....	76
Tabela 25 - Tabela com a Proposta Final para as Transmissões dos 5 Ventiladores	77
Tabela 26 - Materiais e seus Custos Associados para as Transmissões Instaladas de Momento	78
Tabela 27 - Materiais e seus Custos Associados à Proposta da Otimização das Transmissões	79
Tabela 28 - Valores Considerados para o Balanço Energético	115
Tabela 29 - Resultados do Balanço Energético.....	116
Tabela 30 - Tipo e características do pulverizador selecionado	120
Tabela 31 - Acessórios e valores contabilizados nos cálculos de perda de carga do circuito	122
Tabela 32 - Resultados dos cálculos de perda de carga no circuito	122

Tabela 33 - Custo do investimento a fazer para a implementação do sistema de injeção de água.....	123
---	-----

SIMBOLOGIA

A	Fator de potência de base por correia
a	Área circular da tubagem
Area	Área da superfície
B	Fator de potência adicional pela relação de transmissão
C	Fator de potência adicional por correia para a vida da correia
C_L	Fator de correção do comprimento da correia
c_p	Calor específico a pressão constante
$c_{p \text{ água}}$	Calor específico da água a pressão constante
$c_{p \text{ clínquer}}$	Calor específico do clínquer a pressão constante
D	Diâmetro da polia maior
d	Diâmetro da polia menor
E	Valor Final do entre-eixo
F	Fator para o cálculo de A
F_{max}	Força máxima para verificar a pré-carga
F_{min}	Força mínima para verificar a pré-carga
G	Fator de correção do arco de contacto
g	Aceleração da gravidade
H	Altura
h	Fator de entre-eixo
$h_{\text{água}}$	Entalpia da água
$h_{\text{evap a } 100^{\circ}\text{C}}$	Entalpia de evaporação da água a 100 °C
$h_{\text{sat a } 12^{\circ}\text{C}}$	Entalpia da água saturada a 12 °C

$h_{sat \text{ a } 100^{\circ}\text{C}}$	Entalpia da água saturada a 100 °C
h_f	Perda de carga
i	Relação de transmissão
K	Constante do tubo de Pitot
k	Perda de carga num acessório em metros de tubagem linear equivalente
k_s	Fator de serviço
L	Comprimento da tubagem
M	Fator utilizado para o cálculo de T_s
m	Massa específica
$m_{\text{água}}$	Massa específica da água
$m_{\text{clínquer}}$	Massa específica do clínquer
MM	Massa molar do gás
N	Número de correias
n	Velocidade de rotação da polia mais rápida
n_D	Velocidade de rotação da polia maior
n_d	Velocidade de rotação da polia menor
p	Pressão
p_c	Pressão absoluta na conduta
PL	Comprimento da correia
P_n	Potência do motor do ventilador
P_p	Potência de projeto
Q	Energia calorífica da variável medida
$Q_{ar \text{ arrefecimento}}$	Energia calorífica do ar de arrefecimento
$Q_{ar \text{ secagem}}$	Energia calorífica do ar de secagem de combustíveis

$Q_{ar\ secundário}$	Energia calorífica do ar secundário
$Q_{convecção}$	Energia calorífica perdido por convecção
$Q_{ar\ excesso}$	Energia calorífica do ar de excesso do arrefecedor de clínquer
$Q_{ar\ despoeiramento}$	Energia calorífica do ar de despoeiramento
$Q_{radiação}$	Energia calorífica perdido por radiação
R	Constante dos gases perfeitos
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura média da superfície
t	Comprimento do vão de flecha
T_0	Temperatura média ambiente
$T_{água\ inicial}$	Temperatura inicial da água
TBL	Tentativa para o comprimento da correia
T_c	Temperatura do gás em escoamento
TCD	Tentativa de entre-eixo
$T_{clínquer\ saída}$	Temperatura do clínquer à saída do arrefecedor de clínquer
$T_{final\ mistura}$	Temperatura final da mistura de água e de clínquer
T_s	Tensão estática por correia
u	Velocidade do escoamento
V	Caudal volúmico em escoamento
v	Velocidade linear da correia
$V_{ar\ arrefecimento}$	Caudal volúmico do ar de arrefecimento
$V_{ar\ secagem}$	Caudal volúmico do ar de secagem de combustíveis
$V_{ar\ secundário}$	Caudal volúmico do ar secundário

$V_{ar\ despoeiramento}$	Caudal volúmico do ar de despoeiramento
$V_{ar\ excesso}$	Caudal volúmico do ar de excesso do arrefecedor de clínquer
w	Caudal mássico em escoamento
Y	Fator utilizado para o cálculo de F_{min} e F_{max}
Z	Resultado do cálculo para obtenção do n° de correias
ϑ	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
λ	Coefficiente de atrito
η	Eficiência do arrefecedor de clínquer
Δ_p	Pressão diferencial
Δ_T	Diferencial de temperatura
\varnothing	Diâmetro

ABREVIATURAS

CMP	Cimentos Maceira e Pataias, S.A.
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
Secil	Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.
ECL	Empreza de Cimentos de Leiria
CIBRA	Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos. S.A.R.L.
CISUL	Companhia Industrial de Cimento do Sul
CIMPOR	Cimentos de Portugal, SGPS, S.A.
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
PCA	Parque de Combustíveis Alternativos
FLS	FLSmidth

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema Escolhido

No âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, lecionado no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), com a duração de dois anos letivos e onde o aluno escolheu a especialização de Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos, existe a possibilidade de, no segundo ano, fazer um projeto, um estágio curricular ou uma dissertação. Uma vez que o próximo passo a dar pelo aluno a seguir à vida académica pós-Mestrado será o mundo laboral, a escolha recaiu para a vertente de estágio.

Após o diálogo entre o aluno, a empresa e o ISEC, e a respetiva aprovação do estágio, ficou definido que este iria decorrer na sede da CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A., a fábrica Maceira-Liz, no departamento de Manutenção na secção de Engenharia e Fiabilidade e que teria a duração de 1560 horas, com início a 3 de Novembro de 2014 e término a 18 de Setembro de 2015, e cujo tema seria a **“Otimização dos Custos Operacionais de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha”**.

Olhando para a conjuntura atual é possível perceber que cada vez mais a redução de custos operacionais dos processos é uma constante no mundo empresarial, não só pela redução de custos em si, mas também pela melhoria de políticas ambientais e em última análise, para obter um preço mais competitivo do produto no mercado.

Atendendo a que o consumo de energia representa a grande maioria dos custos de operação, em parte pela baixa eficiência de alguns equipamentos presentes em Maceira-Liz, que devido aos seus custos de aquisição, torna inviável a sua substituição, será aqui a intervenção mais vantajosa, caso seja de possível execução, baixando assim os custos inerentes ao processo. É então imperativo tentar baixar o consumo de energia, qualquer que seja a sua fonte.

No caso de uma cimenteira como a fábrica Maceira-Liz, os mercados em que esta se insere devido à queda do consumo de cimento nos últimos anos, embora já se note alguma recuperação, estão sujeitos a uma pressão, nível de exigência e competição muito altas entre empresas, onde o mínimo ganho num determinado processo pode representar um melhor preço para pôr o produto no mercado e naturalmente um maior lucro para a empresa.

Deste modo, uma boa, previsível e atempada manutenção pode ser a melhor chave para a porta do sucesso ao nível do processo, adotando assim um papel de extrema relevância, uma vez que é através desta que se garante o bom e regular funcionamento dos equipamentos, aumentando assim os índices de produtividade e mantendo o nível e a qualidade dos bens produzidos.

Um dos equipamentos mais críticos e onde existem solicitações extremas para alguns dos seus componentes é o equipamento em estudo, que desempenha uma função crucial para a qualidade do clínquer e por consequência no produto final, o cimento.

Ultimamente, uma característica pela qual este equipamento tem pecado são as suas constantes paragens e necessidades de manutenção curativa, uma vez que com as ferramentas existentes ainda não foi possível chegar a um padrão que permita a antecipação da necessidade de paragem do equipamento, nem a causa de alguns dos fenómenos que provocam essas paragens.

Assim sendo, e tendo em conta os motivos das paragens referidas anteriormente onde estão envolvidas elevadas quantias de dinheiro, não só no custo da manutenção em si mas também no custo da paragem da linha de produção, um dos principais objetivos deste trabalho é desenvolver soluções de otimização para o arrefecedor de clínquer, fazendo alterações à sua construção ou até mesmo à sua maneira de operar, bem como a criação de ferramentas que permitam de alguma forma que o funcionamento do arrefecedor seja fiável e previsível, sendo possível fazer uma antevisão das intervenções de manutenção, de modo a que a empresa tenha de suportar os menores custos possíveis.

1.2. Objetivos a Alcançar

O estágio realizado tinha então como objetivos fazer a ligação entre a universidade e o mundo do trabalho, o aprofundamento do conhecimento académico em contexto laboral, o contacto com uma grande diversidade de equipamentos e alguns dos procedimentos para o seu funcionamento e manutenção, o desenvolvimento de competências de antevisão e resolução de problemas na realidade laboral, desenvolver e elaborar soluções de possíveis melhorias a nível de manutenção e funcionamento para o arrefecedor de clínquer, e por último mas igualmente importante, o crescimento e progresso a nível pessoal, uma vez que numa fábrica com a dimensão da referida se lida com o mais variado leque de pessoas nas mais variadas situações e condições.

Com o propósito de atingir o objetivo que poderá ser considerado o de maior relevância, contemplando a natureza deste relatório, propõe-se então que sejam cumpridos os seguintes objetivos:

- Realizar um balanço energético ao equipamento, por forma a determinar as suas necessidades energéticas;
- Estudar e delinear alternativas de melhoria para o equipamento instalado com vista à redução dos custos operacionais deste, tendo sempre em mente a viabilidade das várias hipóteses existentes;
- Idealizar estratégias de manutenção para a instalação, tentando baixar o custo da mesma;
- Realizar uma estimativa o mais próxima possível dos custos reais de cada alternativa por forma ser possível propor alterações que possam ser efetuadas na realidade, e não apenas soluções ideais, muitas vezes só utilizadas no mundo académico.

1.3. Estrutura do Relatório

O relatório aqui apresentado encontra-se estruturado em oito capítulos.

No primeiro capítulo é pretendido dar a conhecer a origem e a razão do estudo feito, apresentando genericamente o trabalho a desenvolver. São então apresentados o âmbito e objetivos, bem como a própria estrutura do relatório de estágio.

De seguida, no segundo capítulo, faz-se uma breve introdução à indústria cimenteira em Portugal, bem como à história da fábrica Maceira-Liz.

No capítulo três é descrito o processo de fabrico de cimento realizado em Maceira-Liz.

Seguidamente no quarto capítulo são expostos os principais tipos de arrefecedores de clínquer, sendo também apresentados e descritos os arrefecedores de clínquer presentes na fábrica Maceira-Liz, dando-se principal relevância a este último ponto.

Já no capítulo cinco, são relatados os problemas identificados como alvo para a tentativa da implementação de melhorias.

No capítulo seis estão patentes os estudos realizados e as soluções de melhoria propostas para cada um dos problemas identificados.

De seguida, no capítulo sete, são referidos alguns dos trabalhos realizados pelo aluno para além dos que foram realizados no âmbito do estágio.

Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões retiradas de todo o trabalho realizado e ainda algumas propostas para possíveis trabalhos futuros.

2. INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Pretende-se neste capítulo fazer uma breve introdução ao cimento e à sua indústria em Portugal, ao grupo Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. e à CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A., com maior particularidade para a fábrica Maceira-Liz.

2.1. O Cimento

Segundo [22] o Cimento, palavra proveniente do latim “Caemento”, é uma matéria com propriedades hidráulicas, ou seja, é um “ligante” que misturado com água endurece, tanto ao ar como na água.

Para melhor compreensão, os ligantes hidráulicos, que é o caso do cimento, são na sua essência pós muito finos que uma vez em contacto com água formam uma massa cujo endurecimento resulta somente pela reação química que se dá entre ambos.

Esta denominação de “ligante” resulta da propriedade que lhe é conhecida de conseguir aglomerar elevadas proporções de materiais inertes, como é o caso da areia, da pedra britada, etc., conferindo ao conjunto um elevado nível de coesão e resistência.

Para além de serem considerados ligantes são ainda considerados hidráulicos pela sua capacidade de endurecerem tanto ao ar como debaixo de água, adquirindo elevadas resistências e desempenhando perfeitamente a sua função.

2.1.1. História do Cimento

Desde os primórdios das civilizações, em que se fizeram tentativas no ramo da construção, que houve o interesse num material com a capacidade de agregar as pedras numa massa sólida e coesa, capaz de dar às construções uma melhor qualidade, proporcionando uma maior segurança e durabilidade.

Foi esta necessidade que levou ao desenvolvimento do cimento como o conhecemos hoje.

Conforme [36], após o uso da argila por parte dos Assírios e Babilónios, da descoberta da cal e do gesso pelos Egípcios e de algumas melhorias feitas pelos Gregos, foram os Romanos quem finalmente desenvolveu um cimento de alta durabilidade.

Assim sendo, e segundo [22], foram então os Romanos o primeiro povo a empregar misturas de cal, areia, pedra partida e outros materiais para a construção de edifícios e pavimentos, sendo as misturas de cal só com areia e água apenas utilizadas para unir estruturas em pedra.

Por meio de experimentações de diferentes materiais, o povo Romano constatou ainda que certas rochas vulcânicas, quando adicionadas à cal, lhe conferiam uma maior resistência à acção

da água. Foi então que da mistura de cal, cascalho e dessas rochas vulcânicas em forma de areia, resultado das experiências referidas anteriormente, foram construídos alguns dos mais emblemáticos monumentos Romanos, como por exemplo o Panteão Romano, o Coliseu e a Basílica de Constantino [22].

Após um período onde a qualidade e a longevidade das construções ficou aquém das dos Romanos, havendo a crença que alguns dos segredos dos doseamentos se tenham perdido ou que os materiais utilizados tivessem pouca qualidade, foi em 1756 na Grã-Bretanha que John Smeaton afirmou que a presença de argila no calcário era o índice mais exato da qualidade do produto obtido pela sua calcinação para obras hidráulicas.

Em 1817 é elaborada a teoria da hidraulicidade, onde Louis Vicat relata de forma detalhada a propriedade hidráulica da mistura conseguida no tempo dos Romanos, enunciando as proporções de calcário e de sílica essenciais para a obtenção artificial de uma mistura que, após a sua cozedura, à temperatura favorável, e conseguinte moagem, se tornará um autêntico ligante hidráulico.

Poucos anos mais tarde surge patenteado por Joseph Aspdin, em 1824, o processo de fabrico de um ligante hidráulico proveniente da mistura de calcário e argila, que diferenciava do que propunha Vicat nas temperaturas mais elevada de calcinação, facultando assim a esse ligante elevadas resistências mecânicas. O produto final, resultado da calcinação e moagem, tinha cor e características semelhantes às das pedras da ilha britânica de Portland, advindo daí o nome de Cimento Portland.

Cerca de vinte anos mais tarde, em 1844, Isaac Johnson, um associado de Aspdin fixa então com rigor as primeiras regras que possibilitam o cálculo das misturas das matérias-primas, determinando em simultâneo o controlo científico do processo.

Assim, como tem sido ao longo de toda a sua história e ainda na atualidade que se vive, o cimento é proveniente de constantes experiências e de uma perseguição de satisfazer as necessidades do ser Humano e as exigências das mais extravagantes obras que se queiram executar.

2.2. Industria Cimenteira em Portugal

Como relatam [12] e [22], a primeira fábrica de cimento em Portugal terá surgido no ano de 1866 em Alcântara, estando apenas onze anos em atividade devido às dificuldades económicas e à má qualidade do cimento produzido.

Seguidamente nasce a primeira fábrica para a produção sustentada de cimento Portland em Alhandra com a marca “Tejo”, propriedade de António de Araújo Rato, que conseguiu alvará para a sua montagem em 1894. Mais tarde, e como resultado das mesmas causas da fábrica em Alcântara sofreu o mesmo fado, reabrindo as suas portas em 1912.

Em 1896 nasce a sociedade Garcia Machado, Bosse & Cie com o intuito de fabricar cimento natural com matérias-primas da Quinta da Rasca. Mais tarde, em 1904, juntam-se a vários

técnicos belgas e dão origem à “Companhia de Cimentos de Portugal”, que levou à instalação da fábrica do Outão em Setúbal, que arrancou com a produção em 1906.

Passados alguns anos, em 1918, tanto as instalações da fábrica do Outão como os seus terrenos anexos são comprados pela Companhia Geral de Cal e Cimento, que os viria a arrendar à Sociedade de Empreendedorismos Comerciais e Industriais, Lda, o que levou à origem da denominação e criação da marca Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A..

Por iniciativa de Henrique Sommer, a 3 de Outubro de 1919 é consumada a escritura da “Empresa de Cimentos de Leiria”, tendo a primeira pedra para a construção da fábrica sido assente a 4 de Julho de 1920. Três anos mais tarde era iniciada a produção nesta instalação fabril situada em Gândara, Leiria.

Dirigente de uma fábrica de mosaicos hidráulicos e mármore artificiais, a 20 de Julho de 1944, Joaquim Matias funda a Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos, S.A.R.L. (CIBRA). Em 24 de Novembro de 1949. Três anos após o começo dos trabalhos de construção das instalações na localidade de Pataias, é aceso o forno pela primeira vez.

Em 1970 é formada a Companhia Industrial de Cimento do Sul (CISUL), que instalou uma fábrica em Loulé, tendo iniciado a sua produção em 14 de Setembro de 1973 [31].

Por mão da família Queiroz Pereira é fundada no início da década de 70 a Cinorte. Concluída a instalação da fábrica em Souselas, arranca a produção com dois fornos, em 1974 e 1975 respetivamente.

Como resultado da nacionalização do sector cimenteiro a 9 de Maio de 1975, nasce a CIMPOR a 31 de Março de 1976.

Anos mais tarde, na sequência do plano de privatização da indústria cimenteira organizado pelo governo Português, em 1992 é criada a CMP – Cimentos Maceira e Pataias, empresa constituída pelas fábricas de Maceira-Liz e Cibra-Pataias.

No desfecho da privatização do sector em causa, em 1994 e 1995 a Secil passa a ser uma empresa de capital inteiramente privado e adquire a CMP, passando a CIMPOR a ser detentora apenas das unidades industriais de Loulé, Alhandra e Souselas.

Neste momento existem duas empresas cimenteiras a laborar em Portugal a explorar seis fábricas de cimento com uma capacidade de produção conjunta de cerca de 13 milhões de toneladas/ano, a SECIL e a CIMPOR. A Secil explora as fábricas Cibra-Pataias, Maceira-Liz e Secil-Outão, enquanto a CIMPOR, explora as fábricas de Alhandra, Loulé e Souselas.

2.2.1. Secil e CMP

Conforme [36] no ano de 1918 a Companhia Geral de Cal e Cimento compra as instalações e os terrenos adjacentes da fábrica do Outão em Setúbal, que aluga à Sociedade de Empreendimentos Comerciais e Industriais, Lda., a Secil.

Nasce então a 1925 a marca Secil, e em 1930 é constituída a Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., como resultado da fusão da Secil com a Companhia Geral de Cal e Cimento e da participação das empresas dinamarquesas F. L. Smidth & Co. e Hojgaard & Schultz A/S.

Com a nacionalização do sector em 1975, a Secil passa a ser uma empresa privada, embora com a maioria do capital público.

Anos mais tarde, e como consequência da reprivatização do sector cimenteiro é criada a Semapa em 1991, com o propósito de concorrer à compra das empresas Secil e CMP [39].

Em Junho de 1994 a Semapa sai vencedora do concurso, adquirindo 51% da Secil e 80% da CMP. No mês de Novembro do mesmo ano, a Semapa vende a sua participação na CMP à Secil. Na segunda fase de reprivatização compra mais 7,94% da Secil e os restantes 20% da CMP [28].

Por fim, em 2003 a Semapa alcança o controlo da totalidade do capital e dos direitos de voto ao comprar 41,06% do capital aos acionistas dinamarqueses FLS e Hojgaard Holdings [39].

Nos dias que correm o Universo Secil é composto por cerca de 40 empresas a operar em vários países e em diferentes continentes, estendendo-se assim de Portugal para o mundo.

Sendo o seu núcleo de atividade a produção de cimento, onde para além de produzir cimento cinzento é proprietária da única fábrica em Portugal que produz cimento branco, a Secil atua ainda em várias áreas como por exemplo a produção de betão e prefabricados com ele feitos, cal hidráulica, rebocos, revestimentos, fibrocimentos, exploração de pedreiras, etc..

Na sua área de maior relevo, a Secil integra em Portugal as fábricas Secil-Outão, Cibra-Pataias e a Maceira-Liz, onde o presente estágio foi realizado.

2.2.1.1 Maceira-Liz

Em 1919, fruto de um projeto de técnicos e capitalistas, liderado por Henrique Araújo de Sommer, é constituída a “Empresa de Cimentos de Leiria” (ECL), com o propósito de construir uma fábrica de cimento Portland na freguesia de Maceira com a marca “Liz”.

Segundo [18], de modo a que a construção da fábrica se tenha desenrolado, foi decisivo o papel e as acções tomadas por um conjunto de personalidades que tiveram o empenho, dedicação e a ousadia necessária para levar avante este projeto. Desse grupo de personalidades, faziam então parte o engenheiro civil José Osório da Rocha e Mello, os engenheiros químicos militares Amável Jardim Granger e Gastão Benjamim Pinto, o militar José de Sommer Ribeiro e ainda o “capitalista” Henrique Sommer, cuja personalidade e acção criadora se destacam.

Tinha sido então a 5 de Maio de 1919 que José Osório da Rocha e Mello, um jovem engenheiro recém-formado na Suíça e que lá fez um estágio de seis meses na mais moderna fábrica que ali existia, partilhando a mesma vontade de Henrique Sommer, de construir uma fábrica de cimento em Portugal, apresenta-lhe a sua proposta na forma do relatório “Notas Industriais. Anteprojecto de uma Empresa”. Nesse relatório, descreve de forma detalhada a maneira como observou, analisou e conferenciou com técnicos e trabalhadores envolvidos no processo de

fabrico de cimento, bem como os inúmeros contactos que adquiriu dos melhores fabricantes de equipamentos necessários para a montagem de uma fábrica de cimento [2].

Rocha e Mello enunciou ainda várias razões para que se construísse uma fábrica de cimento em Portugal, como por exemplo a excelência das matérias-primas que o solo português proporcionava, as arcaicas instalações das fábricas existentes e a qualidade do seu cimento, as poupanças no custo de operação da linha, tanto a nível de pessoal como de consumo energético do sistema a instalar e ainda a competitividade que iriam conseguir, uma vez que iriam conseguir um custo do material produzido relativamente mais baixo aos que circulavam no mercado português.

Para a fábrica a construir, o jovem engenheiro mostrava também uma lista de cálculos pormenorizada de todos os gastos a considerar para uma produção de 35.000t por ano, assim como os aspetos e as prioridades a ter em conta para a escolha do local onde implementar a fábrica.

Com o objetivo superar a qualidade do cimento produzido em Portugal e igualar a do cimento feito lá fora, uma das medidas tomadas, e por onde começou a construção da fábrica, foi a implementação de um laboratório nas instalações fabris, que viria a desempenhar um papel essencial na certificação da qualidade do cimento produzido.

Foi então a 4 de Julho de 1920 que começaram as obras para a construção das instalações da futura fábrica Maceira-Liz, tendo sido inaugurada oficialmente a 3 de Maio de 1923, com o início da laboração do seu primeiro forno [38]. Logo no seu primeiro ano teve uma produção de 7.000 toneladas de cimento Portland de alta qualidade, aproximadamente metade de todo o cimento de baixa qualidade produzido anualmente em Portugal pelas outras duas fábricas em laboração, sendo que mais tarde chegou às 50.000 toneladas ano, o que representava mais do triplo do resto da produção nacional [19].



Figura 1 - Fábrica Maceira-Liz

Anos mais tarde, cessada a chefia de Henrique Sommer em 1944, era António de Sommer Champalimaud, seu sobrinho, que assumia o cargo de Administrador-Delegado da ECL [19].

Com a nacionalização do sector cimenteiro em 1975 nasce a CIMPOR em 1976, formada por um conjunto de fábricas de cimento das quais fazia parte a fábrica de Maceira-Liz. Mais tarde, o sector foi reprivatizado e como consequência disso foram juntas duas fábricas, a Maceira-Liz e a Cibra-Pataias, dando origem à CMP em 1992.

Após concurso público, foi a Semapa quem saiu vencedora em 1994, adquirindo a CMP e também a SECIL, a quem posteriormente vendeu a CMP.

Nos dias de hoje, a Maceira-Liz é ainda parte integrante da CMP que pertence à SECIL e tem uma capacidade de produção de cimento de 1.400.000 t/ano, fruto das duas novas linhas de produção que entraram em funcionamento em 1968 e 1970 [37].

A fábrica Maceira-Liz destaca-se ainda noutra domínio que não o do cimento, uma vez que há mais de 50 anos que no seu perímetro fabril existe uma fábrica de sacos de papel com competência para a produção de 45 milhões de unidades/ano de sacos para as mais variadas indústrias.

É ainda de realçar a existência desde 22 de Abril de 1991 de um museu dentro do perímetro da fábrica, onde se encontra preservado o património histórico e cultural da fábrica Maceira-Liz, sendo alguns dos documentos em arquivo considerados bastante raros tanto para a indústria cimenteira em Portugal como para a indústria cimenteira externa.



Figura 2 - Museu da Fábrica Maceira-Liz

3. PROCESSO DE FABRICO

É pretendido com este capítulo expor de forma resumida o processo de fabrico de cimento por via seca levado a cabo na fábrica de Maceira-Liz, não só para o conhecimento do leitor, mas também para que posteriormente seja mais fácil a compreensão da localização e a importância do equipamento em estudo no presente relatório.

Assim sendo, é possível dividir o processo em 5 grandes fases:

- Extração das matérias-primas;
- Preparação das matérias-primas;
- Cozedura;
- Moagem de cimento;
- Embalagem e expedição.

Por sua vez, estas 5 fases podem ser divididas em várias sub-fases, que são representadas no esquema do anexo I, e descritas de seguida.

3.1. Extração das Matérias-Primas

As matérias-primas são extraídas de duas pedreiras cuja exploração é feita a céu aberto e por andares/patamares, onde a extração da pedra da rocha mãe pode ser feita através de explosivos ou então mecanicamente. Os materiais extraídos são então o calcário, marga e argila.



Figura 3 - Pedreira de Calcário

A matéria-prima do cimento deve ser então uma mistura de proporções bem definidas de cálcio, sílica, alumina e ferro, sendo que na maioria dos casos há necessidade de corrigir alguns destes

elementos, sendo as práticas mais comuns recorrer a outras pedreiras ou ao mercado, através da compra de resíduos que contenham as características pretendidas.

Após a sua extração, os blocos de matéria-prima podem ter dimensões até cerca de 1 m^3 , tendo assim que sofrer uma redução no seu tamanho e portanto, na sua granulometria, para valores aceitáveis. Para este efeito são utilizados britadores de martelos, e daí nasce o nome de Britagem para esta secção da fábrica.

3.2. Preparação das Matérias-Primas

3.2.1. Transporte, Armazenamento e Pré-Homogeneização

O material britado é então transportado para um hangar denominado de pré-homogeneização através de telas de borracha. Estas telas têm instalado em si captadores de metais para que caso haja algum parafuso ou peça de alguma das máquinas da britagem a ser transportado conjuntamente com a matéria-prima, sejam extraídos e não causem problemas no processo.



Figura 4 - Hangar da Pré-Homogeneização

O material transportado é então depositado e armazenado em pilhas, por forma a garantir um “stock” suficientemente grande para que a produção não tenha de parar por falta deste.

Este armazenamento tem ainda como função pré-homogeneizar o material, fazendo uma mistura das matérias-primas nas proporções pretendidas através de um pente que corta transversalmente várias camadas da pilha, provocando a sua queda e consequente mistura. Se necessário são ainda acrescentados outros materiais de correção, também devidamente doseados.



Figura 5 – Pente que faz a Mistura das Matérias-Primas

3.2.2. Moagem, Homogeneização e Armazenamento de Cru

Uma vez seleccionadas e devidamente doseadas, tendo em conta a qualidade de clínquer que se quer produzir, as matérias-primas entram numa segunda fase de redução de tamanho, sendo transportadas até aos moinhos de cru, que no caso particular da fábrica de Maceira-Liz são moinhos de corpo horizontal que se dividem em duas câmaras e que têm no seu interior esferas de aço com diferentes diâmetros que moem o material até um fino pó, o “cru”.



Figura 6 - Moinho de Cru

Ainda no moinho é feito um reaproveitamento dos gases de escape do forno, que têm como objetivo secar a matéria-prima, retirando-lhe uma parte da sua humidade, melhorando assim a economia do processo.

Finalmente, e após ser moído até à granulometria desejada, o material é depositado em silos que não só têm a função de armazenar o material, mas também homogeneizá-lo. A partir deste momento, o material passa então a ser denominado por farinha, a qual servirá para alimentar o forno, sendo esta homogeneização um passo crucial na qualidade do produto à saída do forno, o clínquer.

Existe ainda uma outra moagem de material calcário cru da qual resulta o material denominado por “*filler*”. Este material não é utilizado na cozedura, mas sim como material de adição nas moagens de cimento. O “*filler*” é então obtido pela moagem do calcário num moinho horizontal, que tem no seu interior esferas de várias dimensões, com o objetivo de atingir a granulometria desejada para o este componente. Depois de moído o material é então transportado para um silo, podendo ser usado quando necessário.



Figura 7 - Moinho de "Filler"

3.3. Cozedura

O material armazenado nos silos de homogeneização é então extraído e transportado por um elevador para ser introduzido no sistema de pré-aquecimento, mais conhecido como torre de ciclones. Aqui, os gases de escape resultantes da queima do forno atravessam em sentido ascendente os vários estágios da torre de ciclones, quatro neste caso, fazendo gradualmente ao longo do seu percurso a transferência de calor para o material que entrará no forno, retirando-lhe também parte da sua humidade.



Figura 8 - Torre de Ciclones

Entrando no forno horizontal rotativo e com uma inclinação de cerca de 3,5%, o material se vai-se deslocando ao longo de todo o seu comprimento. É aqui que por acção de um aquecimento do material a cerca de 1400-1500 °C, superior ao sofrido na torre de ciclones e provocado pela combustão de coque de petróleo, CDR (Combustíveis Derivados de Resíduos), que são uma variada mistura de plásticos e papel, e pneus se desencadeiam as reações inerentes ao processo de clinquerização, onde o material que entra no forno como farinha se transforma e sai como clínquer. A capacidade de cada um dos dois fornos instalados é de cerca de 92 ton/h e para realizarem o aquecimento anteriormente mencionado têm um consumo calorífico específico individual de aproximadamente 890 kcal/kg de clínquer.



Figura 9 - Forno Horizontal Rotativo

Para que seja possível a alimentação destes combustíveis ao forno existe para os pneus um parque a céu aberto onde são armazenados para posteriormente serem alimentados a uma tremonha que os encaminha para um transportador de rolos que os faz chegar aos fornos. No caso dos CRD, são armazenados dentro de um parque de combustíveis alternativos (PCA) em 8 “boxes”, para posteriormente serem movimentados por transportes de arrasto até uma tremonha a partir da qual por acção de um agitador e de um compressor são alimentados ao queimador do forno. Por fim, o coque de petróleo é armazenado num silo a partir do qual é transportado por telas até às moagens de carvão onde, por acção de moinhos horizontais com esferas de várias dimensões, é reduzido a um pó fino e armazenado em silos, sendo de seguida transportado por ar dentro de tubagens para alimentar os queimadores dos fornos.



Figura 10 - Em Cima, à Esquerda o Parque de Pneus e à Direita os PCA. Em Baixo, à esquerda o Silo do Petróleo de Coque e à Direita um Moinho de Petróleo de Coque

Após percorrer o comprimento do forno na sua plenitude, o material então já denominado de clínquer, cai para um arrefecedor de clínquer a uma temperatura que normalmente ronda a gama dos 1250 °C a 1400 °C. O tipo dos arrefecedores presentes na fábrica de Maceira-Liz é o arrefecedor de grelhas de 1ª geração, que se divide em duas grelhas e utiliza cinco ventiladores que insuflam ar para cinco compartimentos independentes, sendo que cada compartimento corresponde a um ventilador específico.



Figura 11 - Arrefecedor de Clínquer

Nesses compartimentos, por acção dos ventiladores gera-se uma pressão positiva que força o ar a atravessar transversalmente as grelhas perfuradas que se encontram no topo das câmaras, arrefecendo assim o clínquer até uma temperatura entre os 100 e os 200 °C à medida que este se vai movimentando ao longo do arrefecedor por acção de algumas fiadas de grelhas às quais é conferido um movimento linear de avanço e recuo, havendo também fiadas de grelhas que se encontram fixas e não se movem.

No fim das duas câmaras do arrefecedor existe um britador de martelos cuja função é desagregar as bolas de clínquer de maior dimensão por forma a diminuir a sua granulometria, facilitando as fases seguintes do processo. Passando pelo britador, o clínquer é então transportado para o silo onde é armazenado.

É também sobre este equipamento, o arrefecedor de clínquer, que se debruça este relatório e o trabalho do aluno, sendo que este será descrito com maior detalhe mais à frente.

3.4. Moagem de Cimento

Ainda antes da moagem de cimento propriamente dita, é feita uma pré-moagem do clínquer que é transportado até uma prensa de rolos cujo objetivo é reduzir a granulometria do clínquer por forma a aumentar o rendimento do processo seguinte do moinho de cimento.



Figura 12 - Prensa de Rolos

Esta prensa de rolo não é mais do que o conjunto de dois rolos que são acionados independentemente por motores elétricos, sendo que um dos rolos se encontra fixo enquanto o outro tem a capacidade de se deslocar horizontalmente. Ao cair no meio destes dois rolos o clínquer sofre então uma redução no seu tamanho e portanto na sua granulometria.

Finalmente, e em proporções bem determinadas, é moído o clínquer juntamente com outros materiais, tais como o gesso, o calcário (*“filler”*), cinzas volantes e *“adjuvante”*, sendo este ultimo um material com propriedades hidráulicas que tem como objetivo aumentar o rendimento dos moinhos.

A moagem deste conjunto de materiais é feita em moinhos, obtendo-se assim o material a que se dá o nome de cimento. Os moinhos de cimento presentes nas instalações da fábrica Maceira-Liz são moinhos horizontais divididos em duas câmaras, que têm no seu interior esferas de vários tamanhos que levam a cabo a tarefa de moer os materiais que são inseridos no moinho, cuja moagem conjunta leva ao material cimento.



Figura 13 - Moinho de Cimento

Após a moagem, e por meio de elevadores de alcatruzes e caleiras porosas, o cimento é então transportado para o seu silo correspondente, tendo em conta o tipo de cimento que se está a produzir.

Na fábrica de Maceira-Liz, à data do estágio, eram produzidos segundo a norma NP EN 197-1 seis tipos de cimento, que diferem na sua composição, classe de resistência e nos diferentes tipos de aplicações. Os ensaios feitos para garantir que as características químicas, mecânicas, físicas e os padrões de qualidade dos cimentos produzidos estão de acordo com a norma, são levados a cabo no laboratório existente nas instalações da fábrica.

Tabela 1 - Tipos de Cimento feitos em Maceira-Liz

<i>CEM I 52,5R</i>
<i>CEM I 42,5R</i>
<i>CEM II/A-L 42,5R</i>
<i>CEM II/B-L 32,5N</i>
<i>CEM IV/A 32,5R</i>
<i>CEM II/B-L 42,5R</i>

3.5. Embalagem e Expedição

A venda/expedição de cimento na fábrica onde foi realizado o estágio é possível ser feita de várias maneiras, a granel ou em sacos de 25kg ou 40kg, sendo que no caso dos sacos, estes podem ser vendidos em palete de madeira, que pode ou não ser plastificada, ou em pacotão. Em qualquer uma das variantes é possível o transporte quer por meio ferroviário quer por meio

rodoviário, seja para consumo interno ou externo a partir da fábrica. Existe ainda a possibilidade da exportação por meio marítimo embora seja necessário recorrer a um cais, como por exemplo o cais privativo da SECIL, em Outão.



Figura 14 - Da esquerda para a Direita: Paletes de Sacos de Cimento, Paletes de Sacos de Cimento Plastificadas e Pacotões

Existe ainda a possibilidade, caso seja necessário, de fazer a ensacagem do cimento em sacos de 50kg, por exemplo em casos de exportação de cimento em saco, assim como existe também hipótese da venda em sacos de grande porte com 1500 kg de capacidade denominados por “*Big Bags*”.

Para levar a cabo as ações acima descritas, e de modo a satisfazer as necessidades dos seus clientes, existem na fábrica Maceira-Liz seis pontos de carregamento a granel que alimentam as cisternas que chegam por meio ferroviário ou rodoviário, sendo que apenas dois deles estão aptos a fazer os carregamentos ferroviários, e todos os seis estão habilitados para fazer os carregamentos rodoviários.

Por fim, o enchimento dos sacos com cimento é desempenhado pelas três ensacadoras automatizadas instaladas na fábrica. Uma vez cheios, os sacos seguem através de telas e transportes de rolos até à paletizadora onde são empilhados sobre uma palete, ou até à empacotadora onde são empilhados e envolvidos por uma manga plástica formando um pacotão. Na linha dos pacotões é também possível fazer paletização, embora o contrário não se verifique.

4. ARREFECEDOR DE CLÍNQUER

O clínquer não é mais do que um material de aspeto nodular resultante de um processo de cozedura de uma mistura de vários materiais, vulgarmente designada na gíria por farinha, que começa a ser aquecida na torre de ciclones e que posteriormente é alimentada ao forno onde é então aquecida até cerca de 1400°C, sendo aqui onde se efetua a cozedura propriamente dita e ocorrem as reações químicas e físicas inerentes ao processo e que conferem ao clínquer as suas propriedades e características.

Tendo realizado todo o seu percurso dentro do forno, o clínquer segue então o seu trajeto entrando no arrefecedor de clínquer, onde será arrefecido desde a temperatura a que sai do forno, entre os 1250 e os 1400 °C, até uma temperatura a que possa ser processado daí em diante, que normalmente se situa entre os 100 e os 200 °C embora também possam surgir valores mais altos ou inferiores, atingindo eventualmente a temperatura ambiente já fora do arrefecedor.

Entre outras características que o clínquer apresenta, existe uma que varia com alguma frequência e que nem sempre é fácil e possível controlar é a sua granulometria, uma vez que, para além do seu diâmetro mais comum e desejável que fica entre os 10 e os 25 mm e que nem sempre é conseguido, por vezes formam-se nuvens de clínquer em forma de um pó fino bastante abrasivo, normalmente denominado por “finos” depois de arrefecido, assim como, é também comum a formação de bolas de clínquer com dimensões superiores às pretendidas.

Uma das influências negativas que as nuvens de clínquer de dimensões muito reduzidas representam é que, ao voltarem para forno em conjunto com o ar secundário, ar este que transporta o calor e temperatura proveniente do arrefecimento do clínquer no arrefecedor, perturbam a chama proveniente do queimador do forno, afetando a radiação que esta emite e consequentemente a cozedura do material em si.

No caso particular dos arrefecedores de grelha, para além do incremento do desgaste por abrasão que os finos do clínquer provocam nas partes mecânicas móveis e estáticas de um arrefecedor de clínquer e da influência que têm na chama de aquecimento do forno, devido à elevada temperatura a que por vezes se encontram quando saem do forno para o arrefecedor e a um arrefecimento não uniforme, estas partículas de menor dimensão podem ser a causa de dois fenómenos existentes neste tipo de arrefecedor que serão explicados mais à frente e que se dão pelo nome de “*red river*” e “*snowman*”.

Posto isto, um arrefecedor de clínquer tem então como propósito não só arrefecer rápida e uniformemente o clínquer até uma determinada temperatura para que possa ser processado e garantindo a sua qualidade, mas também recuperar parte do calor presente neste através do ar utilizado para o arrefecer, aproveitando assim o calor presente nesse ar denominado por ar secundário, que detém uma elevada temperatura e portanto uma quantidade de calor substancial,

o que facilitará a combustão do combustível utilizado para o aquecimento do forno, havendo assim uma menor necessidade de consumo de combustíveis.

4.1. Tipos de Arrefecedores de Clínquer

Assim como em tudo o que nos rodeia, também os arrefecedores de clínquer se foram desenvolvendo e sofrendo alterações ao longo do tempo com vista à obtenção de melhorias no seu desempenho, existindo por isso diferentes tipos e configurações deste equipamento.

Segundo [16] é então habitual que em todos os projetos para máquinas deste género sejam apresentados determinados requisitos e exigências para a sua conceção, sendo eles um baixo custo de aquisição, a melhor capacidade de arrefecimento possível para uma boa qualidade do clínquer, uma temperatura baixa do clínquer à saída do arrefecedor, o menor impacto possível para o ambiente, uma boa recuperação de calor, baixo consumo de energia, baixo custo manutenção, que seja fiável e que apresente pouco desgaste de peças por forma a minimizar os tempos de paragem e que seja fácil de operar e controlar, de maneira a conseguir manter um caudal estável de ar a uma temperatura constante para o forno e para o calcinador.

No período de existência dos arrefecedores de clínquer foram vários os desenhos e as soluções propostas e colocadas em prática para equipar as fábricas de cimento, havendo inclusive arrefecedores diferentes dentro da mesma fábrica, o que confirma a veracidade de uma observação que é muitas vezes relatada por trabalhadores na área onde narram que nenhuma fábrica nem nenhuma linha de produção de cimento consegue ser igual a uma outra.

É então possível fazer a divisão dos principais tipos de arrefecedores de clínquer da seguinte maneira:

- Arrefecedor de clínquer Planetário ou de Satélites;
- Arrefecedor de clínquer Rotativo;
- Arrefecedor de clínquer de Grelha;
 - Arrefecedor de clínquer de Grelha de 1ª geração
 - Arrefecedor de clínquer de Grelha de 2ª geração;
 - Arrefecedor de clínquer de Grelha de 3ª geração.

Realizada a divisão acima apresentada, será feita uma breve descrição de cada tipo de arrefecedores por forma a uma melhor elucidação e perceção dos diferentes funcionamentos de cada um, sendo que será dado um maior destaque ao arrefecedor de grelha, não só pelas suas diferentes variações, mas também para uma melhor compreensão deste trabalho.

É ainda de notar que independentemente do tipo de arrefecedor, todos eles são dimensionados tendo por base a capacidade da linha de produção a que se destinam.

4.1.1. Arrefecedor de Clínquer Planetário ou de Satélites

Com o seu nome a refletir a maneira como este se incorpora na linha de produção de cimento, circundando o forno na sua fase final, como que de planetas a circundar o sol se tratasse, arrefecedor planetário ou de satélites consiste num conjunto de cilindros em aço, normalmente de 8 a 11, fixos ao forno e dispostos ao longo da sua circunferência, e que se designam por satélites.



Figura 15 - Arrefecedor de Clínquer de Satélites [41]

Com esta configuração e face à elevada superfície de permuta que apresentam, o espaço ocupado por este tipo de arrefecedores de clínquer é relativamente reduzido quando comparado com outros tipos, assim como o consumo de energia elétrica necessário à sua operação, uma vez que estando fixos ao forno apenas é necessário um ligeiro gasto suplementar de energia por parte do motor que confere o movimento de rotação ao forno para compensar o peso dos vários satélites.

Ao chegar ao fim do forno, após ter realizado o seu processo de cozedura, o clínquer entra então por gravidade nos vários satélites, do arrefecedor à medida que o forno vai girando, sendo constantemente levantado ao longo do seu percurso dentro do arrefecedor por placas designadas por levantadoras, que permitem não só uma melhor troca de calor entre o clínquer e o ar, mas minimizam também os danos provocados pelo clínquer no interior do arrefecedor. Para evitar que o clínquer volte para o forno quando os cilindros estão no topo do forno existe um sistema de retenção que previne esta ocorrência.

No que diz respeito à sua constituição interna, na transição do forno para os satélites existe um revestimento de materiais cerâmicos refratários densos como por exemplo betões, aos quais se podem conferir as formas pretendidas. Já na parte cilíndrica do arrefecedor existe uma zona inicial revestida a tijolo refratário de várias dimensões, seguida consecutivamente de um sector que, devido à elevada temperatura que se faz sentir nessa área, combina a utilização de tijolo ou outro material refratário, como por exemplo os betões, com placas levantadoras. Na extremidade mais fria do são apenas utilizadas as placas levantadoras, não sendo usado nenhum revestimento.

Neste tipo de arrefecedores a troca de calor que resulta no arrefecimento do clínquer ocorre em contracorrente, uma vez que o clínquer sai do forno para percorrer o arrefecedor e o ar, atmosférico, está a fazer o percurso oposto passando pelo arrefecedor para entrar no forno, sendo que todo este ar, que resulta da aspiração da tiragem do forno, é utilizado como ar secundário de combustão, não existindo ar de excesso. O processo de arrefecimento é então limitado pela necessidade de ar para a combustão, uma vez que a quantidade de ar necessária para a combustão será a mesma quantidade de ar que arrefecerá o clínquer.

Algumas das razões, e talvez as principais, pelas quais este tipo de arrefecedores caíram em desuso foram o maior rendimento de outros tipos de arrefecedores quando comparado aos 60 a 68% nesta configuração, dependendo este bastante do tamanho das partículas do clínquer, e a impossibilidade da extração de ar terciário, ar este que é utilizado nos pré-calcinadores dos fornos de instalações mais recentes.

Existem ainda outros pontos que não abonam a seu favor quando comparado com outros modelos de arrefecedores, como por exemplo o seu excessivo ruído de funcionamento, as tensões mecânicas que estão presentes nas ligações dos satélites ao forno e que eventualmente poderão levar à rotura da junta, os custos elevados das suas peças de substituição, o esforço adicional sobre os apoios da estrutura de suporte, a carência de controlo do arrefecimento, dado que depende do ar necessário para a combustão, e ainda a temperatura elevada a que o clínquer sai do arrefecedor, que geralmente em média são 160 °C mais a temperatura ambiente, podendo esta ser reduzida com a adição de água junto à saída do arrefecedor se for exigido.

Embora hajam também fatores que beneficiem este género de arrefecedor em relação a outros e que foram acima referidos, ou como por exemplo o mais reduzido custo de manutenção e a maior durabilidade das suas peças, é então mais comum hoje em dia o uso de arrefecedores de clínquer de outros tipos, embora ainda existam e se fabrique arrefecedores de satélites.

4.1.2. Arrefecedor de Clínquer Rotativo

O arrefecedor de clínquer rotativo tem um funcionamento bastante simples e algo similar ao do arrefecedor de satélites, podendo então este género de arrefecedor quase ser visto como a junção de todos os satélites num tambor de grandes dimensões e que pode estar disposto como que de uma continuação do forno se tratasse ou então, por razões de espaço dadas as suas extraordinárias dimensões, colocado por baixo do forno na direção oposta.

Sendo o seu funcionamento semelhante ao arrefecedor de satélites, também o arrefecedor de clínquer rotativo usa todo o ar atmosférico de arrefecimento do clínquer, resultante da aspiração do ventilador de tiragem do forno, para a queima dos combustíveis, não operando com ar de excesso, embora ao contrário do arrefecedor planetário permita fazer a extração de ar terciário para ser usado nos pré-calcinadores.

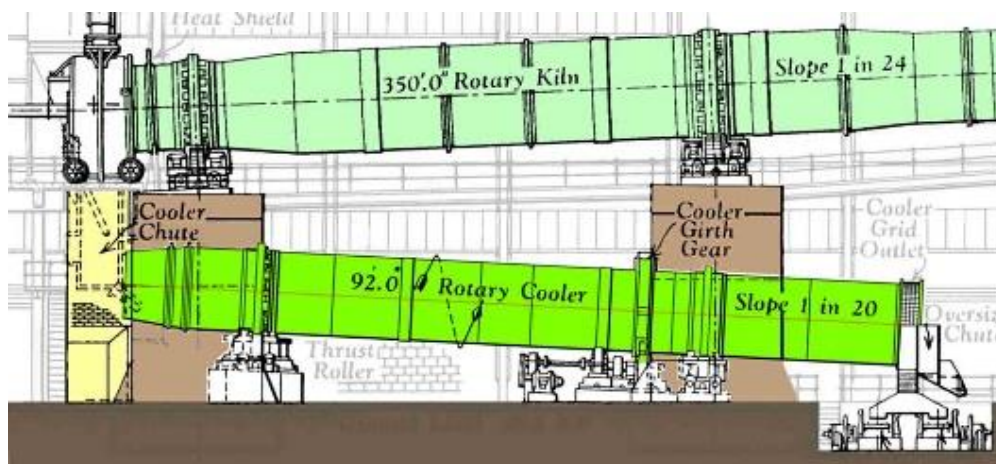


Figura 16 - Forno Horizontal Rotativo e Arrefecedor de Clínquer Rotativo [29]

Á imagem do que se passa nos arrefecedores de satélites, e embora nos arrefecedores rotativos não estejam fixos ao forno como os de satélites, também a forma de entrada do clínquer nestes arrefecedores é deixada a cargo pela gravidade, existindo igualmente placas levantadoras especialmente desenhadas para elevar o clínquer prevenindo assim a degradação do interior do arrefecedor, bem como para proporcionar um melhor contacto entre o ar de arrefecimento e o clínquer, que também é feito em contracorrente, beneficiando a troca de calor.

Interiormente os arrefecedores rotativos são divididos em vários sectores, havendo zonas apenas revestidas com cerâmicos refratários, outras revestidas com material refratário combinado com placas levantadoras para revolver o clínquer protegendo o revestimento e proporcionando um melhor arrefecimento do clínquer, partes em que há um revestimento com placas de aço combinadas com placas levantadoras, com o mesmo propósito referido anteriormente, e por fim, uma zona em que não existe qualquer revestimento, existindo apenas o tambor em aço do arrefecedor com placas levantadoras, que para além da sua intervenção na melhoria no arrefecimento do clínquer, protegem o tambor de aço da alta temperatura a que o clínquer ainda se encontra.

Apresentando um movimento independente do forno, isto é, o seu movimento de rotação é-lhe conferido por uma transmissão que não a do forno, os arrefecedores de clínquer rotativos podem alcançar uma dimensão de até 40% do comprimento do forno, operando com um ângulo de inclinação que pode variar dos 4 aos 7%.

Após percorrer o arrefecedor o clínquer sai então com uma temperatura que pode rondar os 200 a 250 °C, o que representa uma desvantagem em relação aos outros tipos, havendo no entanto a possibilidade da utilização de um *spray* de água na saída do arrefecedor, conseguindo-se assim baixar a temperatura para cerca de 150 °C.

A necessidade de investimentos de aquisição superiores aos dos arrefecedores planetários, a diferença no rendimento pela negativa quando comparados aos arrefecedores de grelha, cerca de 56 a 70%, que tal como nos arrefecedores planetários depende bastante do tamanho das partículas de clínquer, e a falta de controlo do arrefecimento, uma vez que depende do ar

necessário para a combustão, são algumas das razões pelas quais se tem observado uma extinção do uso deste tipo de arrefecedores de clínquer nas fábricas de cimento de hoje.

4.1.3. Arrefecedor de Clínquer de Grelha

Desde que foi patenteado pela primeira vez em 1937 pela Fuller Company, o arrefecedor de grelha com um movimento alternativo (*reciprocating grate*) tornou-se no mais comum tipo de arrefecedor de clínquer utilizado, tão comum que com o aparecimento dos pré-calcinadores nos anos 70 que necessitavam de ar terciário, que não era possível recuperar nos arrefecedores de planetários, os arrefecedores de grelha tornaram-se na opção mais viável [29].

Um dos indicadores da popularidade destes arrefecedores na altura é a estimativa de que entre 1980 e 1986 o arrefecedor de grelha foi responsável por aproximadamente 85% do mercado

O arrefecedor de clínquer de grelha foi sofrendo ao longo do tempo vários desenvolvimentos e mudanças havendo vários desenhos de arrefecedores. Assim sendo, e como já foi mostrado acima, existem três diferentes gerações de arrefecedores de clínquer de grelha, diferenciação esta que foi baseada nas mudanças de grande relevo que este tipo de arrefecedor teve ao longo da sua vida, particularmente na maneira como o ar é conduzido para fazer o arrefecimento do clínquer.

Existem dois fenómenos, o “*red river*” e o “*snowman*”, cuja probabilidade de ocorrência em arrefecedores de grelha é bem real, sendo estes causadores de grandes perturbações no processo e de danos em material.

Devido à temperatura a que se encontram as partículas de clínquer de menores dimensões, os finos, quase que se fundem formando um aglomerado fluidizado ao longo do arrefecedor, como que de um rio incandescente se tratasse, daí a sua designação de “*red river*” [21], sendo parecido o seu aspeto ao da lava saída de um vulcão.

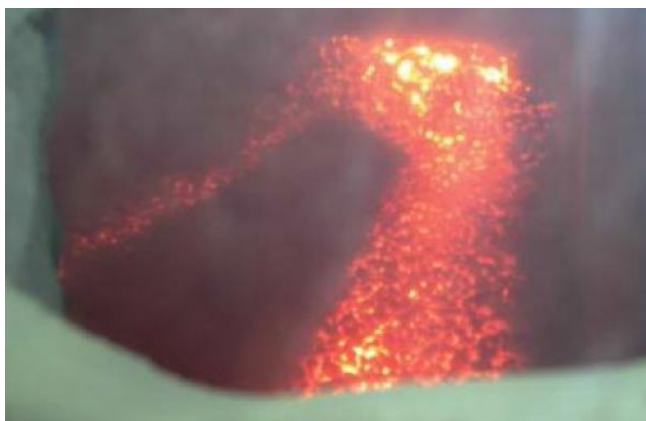


Figura 17 - "Red River" [21]

Este fenómeno acontece naturalmente dentro do arrefecedor e embora não seja fácil, deve tentar evitar-se ao máximo. Normalmente este efeito pode presenciar-se em arrefecedores de clínquer de grelha onde por vezes é difícil ter uma camada de clínquer uniforme em toda a área do

arrefecedor, criando-se assim um ambiente propício à formação do “*red river*” nas zonas em que a camada é mais alta e o ar que é usado para o arrefecimento não consegue transpor na totalidade, mantendo-se uma temperatura elevada no material que está no topo da camada criando assim as condições necessárias à propagação deste acontecimento.

Como consequências deste incidente, e com particular responsabilidade para o deficiente arrefecimento e uniformização da camada, existe uma grande quantidade de calor presente no clínquer que não é reaproveitada e que vai sendo perdida à medida que este vai avançando ao longo do arrefecedor.

Por sua vez, o efeito “*snowman*” [21] origina-se na parte final do forno onde por vezes os nódulos de menor dimensão ou as partículas de poeira de clínquer atinge uma viscosidade tal que começam a aglomerar-se formando pedaços de clínquer de grandes dimensões.



Figura 18 - "Snowman" [21]

Ao cair no arrefecedor, estes grandes pedaços têm tendência a agregar ainda mais material, podendo eventualmente atingir a altura a que o forno se encontra, bloqueando assim a descarga de clínquer do forno para o arrefecedor. O “*snowman*” leva ainda a uma má distribuição do clínquer, resultando numa má troca de calor entre o clínquer e o seu ar de arrefecimento que será utilizado como ar secundário

Posto isto, de seguida serão apresentadas as várias gerações de arrefecedores de clínquer descrevendo o funcionamento de cada uma de modo a que seja fácil a perceção das diferenças entre elas.

4.1.3.1 Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração

Sendo este o arrefecedor de grelha de primeira geração e obviamente o mais simples e portanto o que tem a tecnologia menos avançada, ainda assim é capaz de ter melhores performances do que os arrefecedores acima descritos.

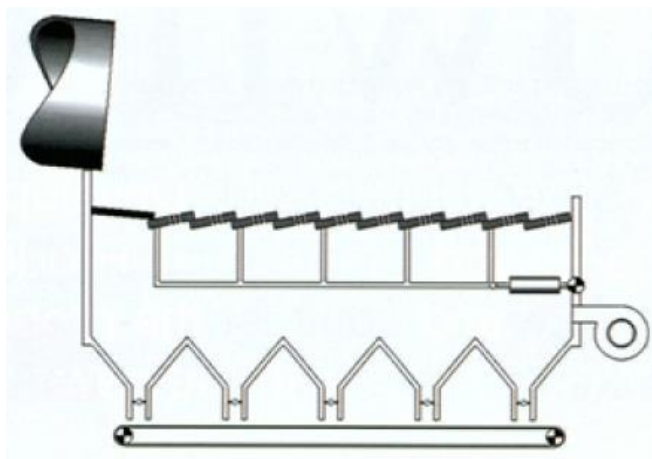


Figura 19 - Esquema Simplificado de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração [5]

Este arrefecedor baseia-se então no conjunto de duas ou mais grelhas que são compostas por placas em aço fundido com resistência à temperatura e perfuradas colocadas lado a lado formando filas horizontais de placas que se sobrepõem umas sobre as outras formando as grelhas. Estas grelhas podem ou não ter alguma inclinação no sentido do fluxo de clínquer, existindo também vários tipos e diferentes desenhos de placas que compõem as grelhas dependendo da zona que se trata e do fabricante em questão, uma vez que são vários os desenhos propostos existentes na procura do melhor desempenho possível.

Neste tipo de arrefecedor algumas das filas de placas são fixas à estrutura principal, enquanto outras filas estão fixas a uma estrutura metálica à qual é conferido o movimento alternativo de avanço e recuo que pode ser variável e que lhe é proporcionado através de uma transmissão excêntrica, o que faz com que o clínquer vá avançando ao longo do arrefecedor. Usualmente na formação de uma grelha são alternadas entre si filas fixas com filas móveis.

Ao efetuar o movimento de avanço e recuo, muitas vezes o clínquer mais fino pode passar entre as placas ou pelos orifícios destas e cair para a câmara por baixo da grelha, pelo que nessa câmara existem várias tremonhas que recolhem o material que é posteriormente descarregado, de maneira a que não se perca a pressurização do compartimento, através de um sistema de clapet's duplos ou duplas válvulas de guilhotina, que podem ser pneumáticas ou motorizadas, num transporte de arrasto que o conduz até à parte final do arrefecedor seguindo daí para a frente com o resto do clínquer.

A câmara que existe por baixo das grelhas do arrefecedor de clínquer não é mais do que uma câmara de insuflação que é dividida em vários compartimentos pressurizados pelo ar é que é insuflado nestes por vários ventiladores, ar esse que irá arrefecer o clínquer. Embora possam ter diferentes dimensões de maneira a satisfazer as necessidades de arrefecimento de cada zona, usualmente é utilizado um ventilador por compartimento.

Assim como noutros arrefecedores, também o arrefecedor de grelha é isolado e protegido com material refratário seja ele tijolo ou betão, dependendo da zona e da facilidade de utilização de

cada um deles nessa zona, sendo que toda a câmara acima das grelhas é isolada com estes materiais.

No final do arrefecedor é ainda quase que padrão a existência de um britador de clínquer, habitualmente de martelos, que tem como principal objetivo reduzir o tamanho dos fragmentos de clínquer de maiores dimensões, mas também a devido ao seu movimento o clínquer é projetado e arrefecido novamente.

Como referido anteriormente o ar de arrefecimento nos arrefecedores de grelha é proveniente da insuflação feita por ventiladores que normalmente podem variar o seu tamanho e configuração consoante as condições necessárias para a zona em que serão aplicados. Estes ventiladores são dotados de motores com variadores de velocidade pelo que conseguem insuflar mais ou menos ar consoante a necessidade que haja, embora nos primórdios antes de serem providos com os variadores de velocidade se usassem válvulas para fazer a regulação da passagem de ar nas condutas dos ventiladores.

O ar atmosférico de insuflação atravessa então as placas das grelhas no sentido ascendente, fazendo o arrefecimento do clínquer no que se pode chamar de uma corrente cruzada, uma vez que o ar faz o seu caminho perpendicularmente ao seu sentido de movimento do clínquer. É possível neste tipo de arrefecedor arrefecer o clínquer até temperaturas bastante baixas, tão baixas quanto 65 °C acima da temperatura ambiente ou até mesmo inferiores [9].

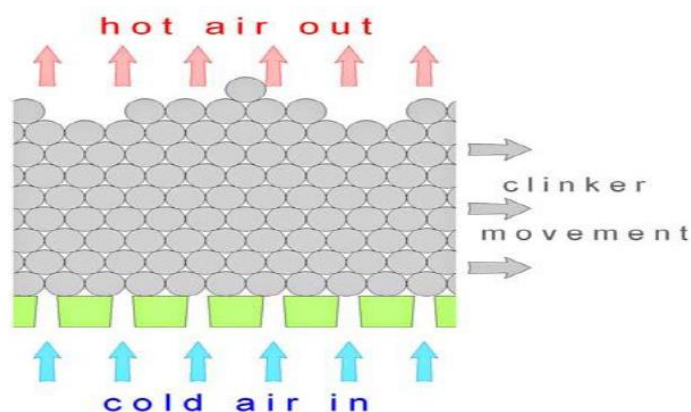


Figura 20 - Passagem do Ar de Arrefecimento pela Camada de Clínquer [20]

Tendo este género de arrefecedor no mínimo duas grelhas, é na primeira grelha onde o clínquer cai do forno para o arrefecedor por acção da gravidade e é também aí que se consegue fazer a melhor recuperação do calor retirado ao clínquer pelo ar de arrefecimento.

Parte desse ar de arrefecimento, agora com uma elevada temperatura habitualmente na ordem dos 800 °C, vai diretamente para o forno para ser usado e facilitar a queima dos combustíveis. Mais à frente ainda na primeira grelha, embora que a uma temperatura inferior, é então recuperado o ar terciário que tem como objetivo ser utilizado nos pré-calcinadores, ou então, recupera-se esse ar para outras fases do processo, como por exemplo para fazer a secagem de combustíveis.

Finalmente, o ar de excesso sai ao fundo do arrefecedor em direção à chaminé deste, passando por uma série de filtros para fazer o seu despoeiramento, sendo também usual fazer o aproveitamento deste ar ainda quente para aquecer a água de uma caldeira para, por exemplo, efeitos de climatização.

Claro que nem tudo é ótimo, as placas utilizadas nas grelhas, e apesar do desenvolvimento que tiveram ao longo do tempo a nível de materiais e de desenhos, estando expostas às elevadas temperaturas do clínquer e à sua capacidade de abrasão, que é acentuada pelo movimento conferido às filas de placas móveis, estão regularmente a ser mudadas por razões de desgaste, chegando mesmo a haver casos de fraturas de placas.

A nível de manutenção este tipo de arrefecedores tem então alguma desvantagem, não só pelo caso das placas mas também porque é necessário garantir um bom funcionamento dos ventiladores e do mecanismo que garante o movimento de avanço e recuo nas grelhas.

Também o gasto de energia é superior por parte destes arrefecedores, uma vez que é necessário consumir energia nos ventiladores que fazem a insuflação do ar que arrefece o clínquer, no ventilador de extração da chaminé do arrefecedor e ainda nos motores que proporcionam o movimento às grelhas.

Por todas as características expostas acima, apesar de algumas serem inconvenientes, e apresentando este tipo de arrefecedor um rendimento alcançável entre os 60 e os 70%, superior aos outros arrefecedores existentes na altura, é então fácil de perceber o porquê da preferência por este tipo e a sua supremacia no mercado.

4.1.3.2 Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 2ª Geração

Representando uma evolução em relação ao arrefecedor de grelha de 1ª geração, o arrefecedor de clínquer de grelha de 2ª geração, também conhecido como “*air-beam*”, é resultado da aplicação de algumas características fundamentais de projeto que se foram desenvolvendo e evoluindo ao longo dos anos.

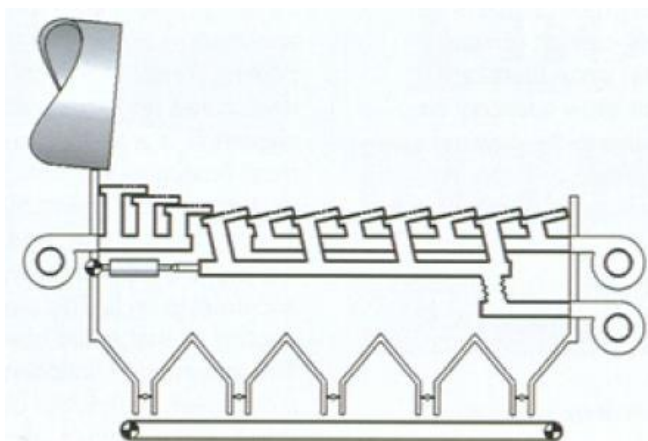


Figura 21 - Esquema Simplificado de um Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 2ª Geração [5]

A tecnologia “*air-beam*” é então a maior diferença entre a 1ª e a 2ª geração de arrefecedores de grelha e a origem da sua diferenciação. Esta inovação consta da diferente abordagem à forma como é feita a insuflação do ar.

Ao invés de como nos arrefecedores de grelha de 1ª geração os ventiladores estarem a insuflar o ar de arrefecimento para os compartimentos por baixo das grelhas gerando uma pressão positiva dentro destes fazendo com que o ar ascenda atravessando as placas e arrefecendo o clínquer, aqui, o ar é conduzido através de condutas desde os ventiladores até às placas das grelhas.

Deste modo, consegue-se evitar que o ar se disperse por zonas que lhe ofereçam menos resistência, por exemplo onde não existe camada de clínquer ou onde esta é muito baixa, garantindo assim um arrefecimento mais uniforme da camada de clínquer em toda a largura do arrefecedor, aumentando sua eficiência. Esta tecnologia associada a placas com um desenho mais desenvolvido contribui também para uma melhor longevidade da grelha e para uma melhor recuperação de calor.

Assim como no arrefecedor de grelha de 1ª geração, também neste tipo foram vários os desenhos propostos, sendo que todos convergiam num ponto, uma elevada resistência ou queda de pressão do ar ao atravessar as placas das grelhas, garantindo assim um melhor arrefecimento e uma menor percentagem de clínquer que cai através das placas da grelha para a zona inferior do arrefecedor.

Foram também várias as abordagens à temática das filas de placas fixas e móveis, embora se tenha estabelecido como prática comum o uso de algumas filas estáticas e com alguns graus de inclinação na zona de queda do clínquer e recuperação de calor. Esta medida foi tomada com vista a uma menor necessidade de manutenção e de longevidade dessa zona.

Comparando o arrefecedor de grelha de 2ª geração com o de 1ª, o resultado é uma redução considerável na perda de calor, uma dimensão inferior do arrefecedor de aproximadamente 30%, uma diminuição da necessidade de ar de arrefecimento na ordem dos 30 a 40%, uma operação mais estável do forno e do arrefecedor, um decréscimo da tendência de formação do “*red river*” e custos de manutenção possivelmente mais baixos [9].

Também no final deste género de arrefecedor existe um britador de clínquer, onde podem ser utilizados os mais convencionais britadores de martelos ou então os mais modernos britadores de rolos.

Já o movimento alternativo conferido à estrutura onde estão fixas as filas de placas móveis das grelhas fica agora a cargo de cilindros hidráulicos, capazes de oferecer uma maior flexibilidade, fiabilidade e facilidade de manutenção quando comparado aos sistemas mecânicos.

No caso de instalações com arrefecedores de grelha de 1ª geração, foram ainda propostas e até mesmo executadas soluções de “*retrofit*”, aplicando o sistema “*air-beam*” neste tipo de arrefecedores, conseguindo assim uma redução do ar se insuflação e na circulação de poeiras, bem como uma melhoria na recuperação de calor. Normalmente, fazendo esta alteração, apenas

é usual a aplicação do sistema “*air-beam*” na primeira grelha do arrefecedor, deixando o sistema de arrefecimento das restantes grelhas inalterado.

Como todos os outros arrefecedores também este tem as suas desvantagens, entre as quais a afinação que as válvulas, os tubos, os amortecedores e os conectores do sistema “*air-beam*” requerem por parte do operador, a redução da performance do sistema com o desgaste das placas das grelhas, a necessidade de ar suplementar ao facultado pelo “*air-beam*”, ou seja, ar insuflado pela maneira convencional, e ainda a contínua possibilidade da passagem de clínquer para a zona abaixo das grelhas, havendo ainda necessidade de um sistema para a sua recolha.

Por todas estas razões, existia ainda na indústria cimenteira a necessidade de um sistema mais avançado, o que viria a ser uma realidade na década de 90.

4.1.3.3 Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 3ª Geração

Em 1997 a FLSmidth®, que havia adquirido a Fuller Company em 1990, lança no mercado o primeiro arrefecedor de clínquer de 3ª geração com o nome de Cross-Bar™, representando este modelo de arrefecedor, possivelmente, o maior desenvolvimento no processo de arrefecimento de clínquer.

Este arrefecedor apresentava então características inovadoras como por exemplo uma grelha totalmente estacionária, a separação dos mecanismos de transporte e de arrefecimento do clínquer, a montagem modular e um controlo ativo do caudal de ar de arrefecimento para todas as placas da grelha. Com estas características, os arrefecedores de 3ª geração proporcionavam então uma elevada fiabilidade, baixos custos de manutenção e uma excelente eficiência do processo. Em alguns casos, e tal como aconteceu com os arrefecedores de 2ª geração, foram propostas soluções de “*retrofit*” que podiam ser executadas em qualquer arrefecedor de grelha, e cujo valor de aquisição era mais acessível [9].

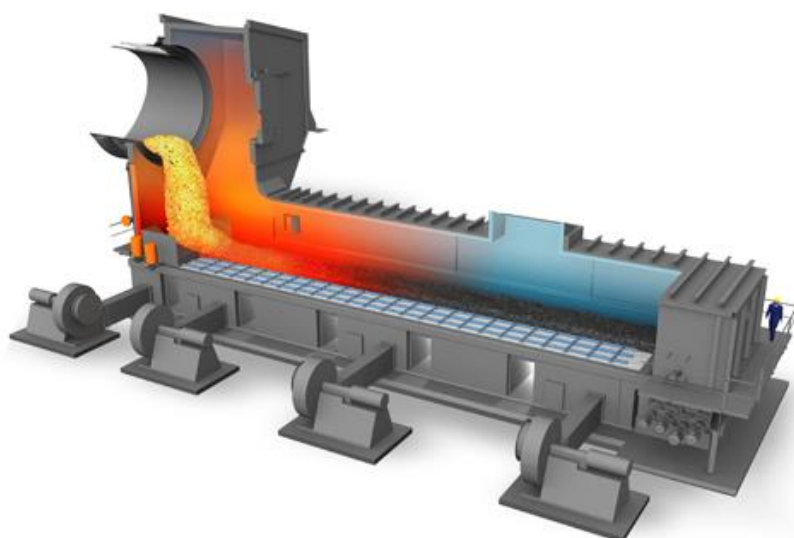


Figura 22 - Arrefecedor de Clínquer Cross-Bar™ [7]

Assim, o arrefecedor de clínquer Cross-Bar™ consiste num conjunto de módulos que são acoplados uns aos outros lado a lado e topo a topo, criando uma grelha totalmente estacionária. Esta grelha é então composta por placas perfuradas para fazer o arrefecimento do clínquer, placas estas que têm um sistema mecânico de controlo que regula o caudal de ar que passa por cada uma e que está presente em todas as placas da grelha, garantindo assim a melhor capacidade de arrefecimento possível e evitando situações em que o ar se possa dissipar por zonas de camada de clínquer mais baixas que lhe ofereçam menor resistência. Tal como nos arrefecedores de grelha de 1ª geração, na zona por baixo da grelha existem compartimentos para onde é insuflado o ar de arrefecimento.

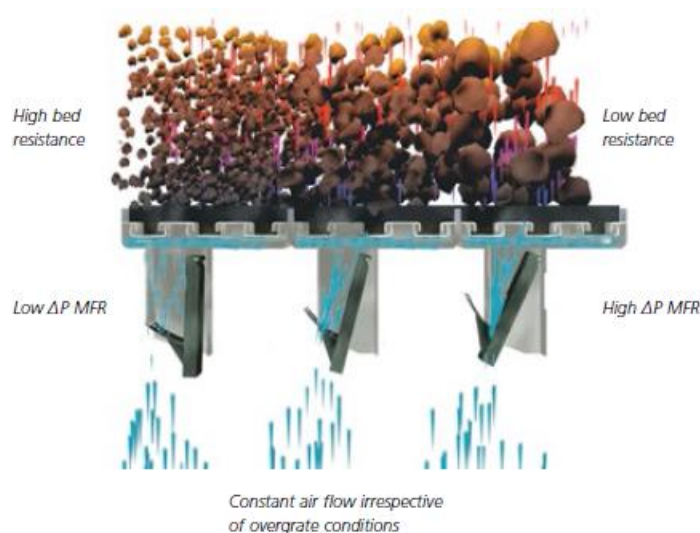


Figura 23 - Sistema de Regulação de Passagem de Ar utilizado no Arrefecedor Cross-Bar™ [7]

Estando toda a grelha fixa, o transporte do clínquer ao longo do arrefecedor fica então a cargo de barras dispostas em toda a área do arrefecedor com a configuração que se pode observar nas imagens da figura 24, e que ao mesmo tempo misturam e distribuem o clínquer, preparando-o para uma mais eficiente exposição ao ar de arrefecimento. Deste modo, separando os mecanismos de arrefecimento e transporte consegue-se que o desgaste destas barras não tenha efeito no funcionamento do arrefecedor, mantendo-se uma eficiência térmica elevada [7].

O movimento de avanço e recuo de cada linha de barras é então levado a cabo individualmente por 2 ou 4 cilindros hidráulicos consoante o tamanho do arrefecedor, pelo que o acionamento de cada linha de barras é independente, o que permite que haja movimentações diferentes entre as linhas de barras com o propósito de se poder adaptar o seu movimento ao tipo de camada de clínquer existente, embora também possível que todas se movimentem no mesmo sentido.

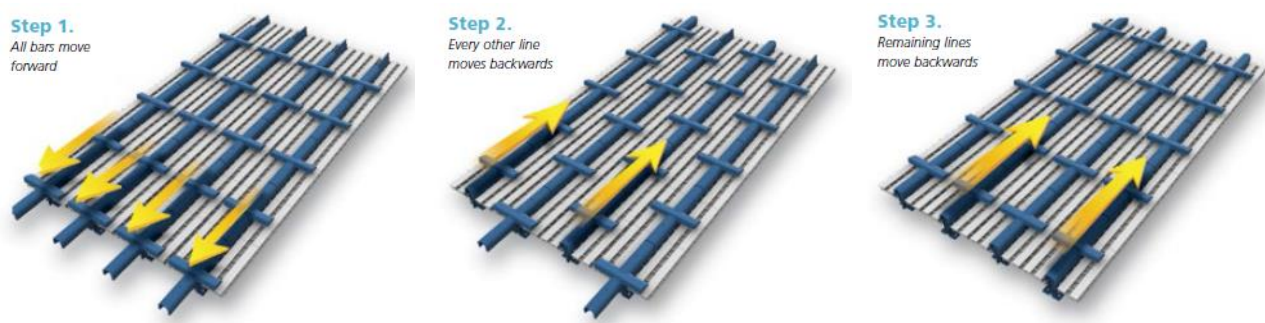


Figura 24 – Representação do Movimento das Barras no Arrefecedor Cross-Bar™ [7]

No fim do arrefecedor existe tal como nas outras gerações um britador de clínquer, onde também pode ser opção o mais tradicional britador de martelos e o mais moderno britador de rolos.

Os arrefecedores de grelha de 3ª geração apresentam então alguns benefícios em relação aos que lhe antecederam, e são eles a sua maior fiabilidade, a menor necessidade e maior previsão da sua manutenção, a utilização das mesmas peças em várias zonas, a elevada e constante eficiência térmica ao longo do tempo e a facilidade de instalação.

Através do seu desenho é também evitada neste arrefecedor a passagem de fragmentos e partículas de clínquer para as câmaras abaixo da grelha, pelo que deixa de haver necessidade de um sistema para a recolha desse clínquer o que representa só por si uma enorme vantagem. Existe ainda uma zona de entrada do clínquer fixa, designada por FLSmidth® ABC™, que permite uma melhor distribuição da camada de clínquer e ao mesmo tempo previne o aparecimento do efeito “snowman”.

Hoje em dia já existem outros arrefecedores de grelha de 3ª geração, embora com desenhos diferentes, como por exemplo o “POLYTRACK®” da Polysius, o “ETA Cooler®” da Claudius Peters e o “PYROFLOOR®” da KHD.

4.2. Arrefecedores de Clínquer em Maceira-Liz

Atentando aos principais tipos de arrefecedores acima enunciados e brevemente descritos, é então de possível perceção pelas imagens imediatamente abaixo expostas que os dois arrefecedores de clínquer presentes na fábrica Maceira-Liz são arrefecedores de grelha de 1ª geração, fabricados em 1986 pela empresa GATX-FULLER S.A. e cujo modelo é o 7x17 H/7x32 H (NS), com 18,245 m de comprimento, 3 m de largura e aproximadamente 3 metros de altura na zona acima das grelhas.



Figura 25 - Arrefecedor de Clínquer de Grelha de 1ª Geração Instalado na Fábrica Maceira-Liz

Uma vez que os dois arrefecedores de clínquer têm as mesmas características, podendo até dizer-se que são gémeos, diferindo apenas nas marcas de alguns equipamentos, como por exemplo em motores elétricos, daqui em diante serão analisados como de apenas um arrefecedor se tratasse.

Assim sendo, este arrefecedor é constituído por duas grelhas compostas por 101 placas no caso da primeira grelha e 224 placas no caso da segunda grelha sobre as quais é movimentado o clínquer, tendo o arrefecedor uma capacidade de processamento de clínquer nominal de 1300 ton/dia e de 1700 ton/dia em avalanche. Proveniente do forno e apresentando um valor nominal de temperatura de 1370 °C, o clínquer cai sobre uma zona feita em betão refratário à qual se dá o nome de altar e que tem não só como objetivo evitar que o clínquer caia diretamente na grelha com todas as repercussões que isso acarretaria, mas também fazer a melhor distribuição possível da camada de clínquer. O altar e o seu formato podem então ser identificados na Figura 26.



Figura 26 - Altar do Arrefecedor de Clínquer Instalado em Maceira-Liz

As grelhas são então compostas por filas de placas fixas intercaladas com filas de placas às quais é conferido um movimento de avanço e recuo. De maneira a que seja possível o movimento dessas filas de placas, estas encontram-se fixas a uma estrutura guiada por rodízios para que não tenha um movimento desalinhado e à qual é conferido o movimento linear de avanço e recuo das filas de placas, movimento que lhe é então conferido por acção de um mecanismo excêntrico, sendo a sua velocidade variável consoante a altura da camada de clínquer com que se queira operar.



Figura 27 - À esquerda, a Estrutura do Movimento das Grelhas e os Rodízios que a guiam. À direita, está o Mecanismo que Confere o Movimento à Estrutura representada na Imagem à Esquerda.

Para garantir o rápido arrefecimento e a qualidade do clínquer, este arrefecedor está então dotado de 5 ventiladores centrífugos aliados a 5 motores elétricos, correspondendo cada ventilador a um compartimento localizado na zona inferior à grelha, e cujas características estão representadas na tabela 2. Os motores destes ventiladores estão munidos com variadores de velocidade para que se consiga regular o caudal de ar que é insuflado tendo em conta as necessidades do processo.



Figura 28 - Compartimento de Insuflação de Ar de Arrefecimento

Tabela 2 - Características dos Ventiladores do Arrefecedor de Clínquer

Ventilador 1	15120 m ³ /h a 1500 rpm 48 kW a 1500 rpm Polia- \varnothing =224 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-4000	Motor 1	AC 3F - 380 V 75 kW 1480 rpm Polia- \varnothing =236 mm de 6 gornes
Ventilador 2	22600 m ³ /h a 2050 rpm 48 kW a 2050 rpm Polia- \varnothing =280 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	Motor 2	AC 3F - 380 V 75 kW 1484 rpm Polia- \varnothing =400 mm de 4 gornes
Ventilador 3	27720 m ³ /h a 1970 rpm 50 kW a 1970 rpm Polia- \varnothing =300 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	Motor 3	AC 3F - 380 V 75 kW 1480 rpm \varnothing Polia- \varnothing =400 mm de 4 gornes
Ventilador 4	47160 m ³ /h a 1570 rpm 59 kW a 1570 rpm Polia- \varnothing =236 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-3750	Motor 4	AC 3F - 380 V 75 kW 1480 rpm Polia- \varnothing =250 mm de 6 gornes
Ventilador 5	51120 m ³ /h a 1475 rpm 51 kW a 1475 rpm Polia- \varnothing =500 mm de 4 gornes 4 Correias SPA-4000	Motor 5	AC 3F - 380 V 75 kW 1485 rpm Polia- \varnothing =500 mm de 4 gornes

No final das grelhas que compõem este arrefecedor encontra-se uma cortina de correntes que regularizam a camada de clínquer ao mesmo tempo que protegem o interior do arrefecedor dos fragmentos de clínquer que são projetados pelo britador.

O clínquer é então orientado na direção do britador de martelos, que é também parte integrante do arrefecedor, através de um grupo barras inclinadas. Aqui, os fragmentos de clínquer de menores dimensões caem por entre as barras seguindo para o transporte enquanto os de maiores dimensões são então alvo do efeito do britador que lhes reduz o seu tamanho, facilitando assim o processo daí em diante.

Este britador, ilustrado na figura seguinte, não é mais do que um veio no qual são fixos 8 apoios com um aspeto quadrangular e que têm entre si algum desfasamento relativamente às suas posições. É então nesses apoios que são fixos os martelos do britador, neste caso são utilizados 2 martelos por apoio, aumentando assim a capacidade e performance do britador.



Figura 29 - À Esquerda está a Cortina de Correntes e à Direita o Britador do Arrefecedor de Clínquer

Tendo em conta o ambiente e as condições severas do processo e por forma a evitar danos provenientes deste, o britador é então confinado num espaço que se encontra revestido com forras em chapa de aço, como pode também ser observado na imagem imediatamente acima representada, com o objetivo de ao longo do processo serem essas forras a sofrer o desgaste dos contínuos impactos de fragmentos de clínquer e não a estrutura do arrefecedor.

Por fim, o clínquer que já passou pelo britador, e agora com uma granulometria e temperatura nominais de 25 mm e 78 °C mais a temperatura ambiente (considerada neste caso 25 °C), é então transportado até ao silo onde é armazenado até que seja necessário e volte a ser introduzido no processo produtivo.

Quanto ao ar insuflado pelos ventiladores para fazer o arrefecimento do clínquer, existem três caminhos que lhe estão destinados. No caso do ar que é insuflado na primeira grelha, tendo em conta que é nesta zona que se recupera a maior parte do calor retirado pelo ar ao clínquer, este ar é recuperado na zona do altar e utilizado como ar secundário para a combustão, fazendo o percurso inverso ao do clínquer e saindo do arrefecedor para o forno através do cabeçote, que faz a ligação entre o forno e o arrefecedor.

Ainda na primeira grelha, embora já na zona final, é ainda recuperada parte do ar insuflado para ser utilizado na secagem do combustível, que neste caso particular é o petróleo de coque. Tanto esta zona de recuperação como a zona de recuperação de ar secundário podem ser identificadas na Figura 30.



Figura 30 - Primeira Grelha do Arrefecedor de Clínquer de Maceira-Liz

No caso do ar remanescente insuflado na primeira câmara e do ar que é insuflado na zona da segunda grelha, como este ar não é aproveitado para mais nenhuma fase do processo é então considerado como ar de excesso e é conduzido no sentido da chaminé de exaustão do arrefecedor, fazendo esse percurso através da acção do ventilador de extração da chaminé.

Logo à saída do arrefecedor, ainda com ligação a este, existem tremonhas de decantação onde são recolhidas algumas das partículas de clínquer presentes no ar de excesso antes de seguir para a chaminé.

Embora a temperatura a que o ar ainda se encontra não sirva para outra parte do processo, faz-se passar o ar por uma caldeira onde é feito o aquecimento de água para fazer a climatização do edifício administrativo. No verão, essa mesma fonte de água quente é aproveitada e utilizada como auxílio no processo de um chiller de absorção, que tem como propósito produzir água fria para ser utilizada no circuito de climatização para arrefecer o ar ambiente do edifício. Esta situação de aquecimento/arrefecimento torna-se possível recorrendo-se ventiloconvectores como unidades terminais.



Figura 31 - À Esquerda, as Tremonhas de Decantação à Saída do Arrefecedor e à Direita, a Caldeira do Sistema de Climatização

Como o ar contém ainda algumas partículas finas de clínquer há necessidade de o filtrar antes de ser lançado na atmosfera, tarefa que não é possível sem o arrefecer até uma temperatura inferior a 120°C, a partir da qual é seguro fazer o seu despoeiramento em fitros de mangas. O arrefecimento deste ar de excesso é então levado a cabo por um permutador de calor ar-ar, recorrendo a 12 ventiladores axiais.

Depois de filtrado o ar pode então finalmente ser libertado para a atmosfera de uma forma segura, cumprindo os regulamentos pelos quais se rege a fábrica.



Figura 32 - À Esquerda, o Permutador de Calor Ar-Ar e à Direita, o Filtro de Mangas, o Ventilador da Chaminé e a Chaminé

Para que seja mais perceptível o funcionamento deste arrefecedor de clínquer, é representado no anexo II um esquema simplificado do mesmo com esse propósito.

4.2.1. Constituição das Grelhas do Arrefecedor de Clínquer

Como já foi referido anteriormente o tipo de arrefecedor de clínquer que equipa as duas linhas de produção da fábrica Maceira-Liz é composto por duas grelhas. Por sua vez, as grelhas são formadas por vários tipos de placas com diferentes desenhos e ligas de aço fundido.

A formação das grelhas do arrefecedor e a disposição dos tipos de placas têm então o *layout* ilustrado na Figura 33, onde se consegue fazer a distinção da primeira e da segunda grelha correspondendo a primeira grelha à 1ª câmara, com aproximadamente 2,56 m de comprimento, e a segunda grelha à 2ª câmara, com aproximadamente 15,7 m de comprimento, referidas na imagem.

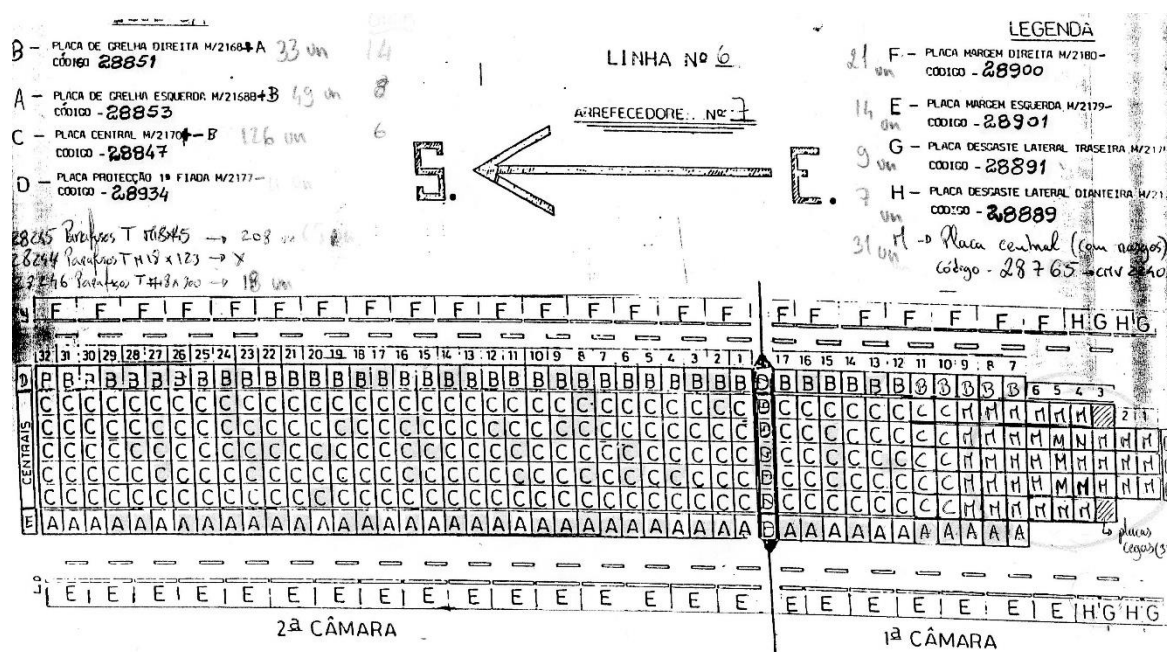





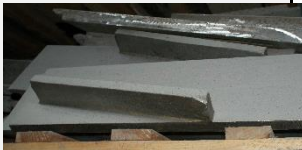


Figura 33 - Layout da Disposição das Placas nas Grelhas do Arrefecedor

Assim, são representadas na tabela 3 as principais placas visíveis que compõem as grelhas. Existem ainda placas que ficam cobertas como por exemplo as que ficam por baixo do betão refratário que é depositado para a formação do altar, não tendo estas qualquer capacidade ou influência no arrefecimento do clínquer.

Tabela 3 – Tipos de Placas Utilizadas nas Grelhas do Arrefecedor de Clínquer

<i>Placa</i>	<i>Código Interno</i>	<i>Liga</i>	<i>Ilustração</i>
<i>Placa Central com Sulcos</i>	28765	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	
<i>Placa Central</i>	28847	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	
<i>Placa Lateral Esquerda</i>	28853	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	
<i>Placa Lateral Direita</i>	28851	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	
<i>Placa de Margem Esquerda</i>	28901	GX40 CrNiSi 22-10 DIN	
<i>Placa de Margem Direita</i>	28900	GX40 CrNiSi 22-10 DIN	

Por forma a garantir a rigidez da grelha e para que não hajam placas soltas, estas são então fixas aos seus suportes, que por sua vez são fixos às estruturas, através de parafusos com um desenho específico para o efeito, sendo no final a porca soldada ao parafuso para que não se soltem com os movimentos e vibrações de serviço.



Figura 34 - Fixação das Placas aos seus Suportes

5. IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS

Na base do estágio que trata este relatório estava a identificação e as causas dos diferentes problemas que afetam o arrefecedor de clínquer. Uma vez identificados os problemas de maior relevância com impacto direto no serviço do arrefecedor e cujas soluções não seriam de tão simples análise, o objetivo era então desenvolver soluções práticas que resolvessem as diferentes situações problemáticas, tendo sempre em mente a viabilidade dessas soluções.

Um dos problemas que vinha a ser verificado era a baixa duração em serviço das correias dos ventiladores de insuflação de ar do arrefecedor, o que numa situação extrema pode levar à paragem do arrefecedor e consequentemente da linha de produção que o antecede.



Figura 35 - À Esquerda, dois dos Ventiladores do Arrefecedor e à Direita, a Degradação das Correias Substituídas

Para além do serviço que desempenham e as solicitações a que estão sujeitas, uma das razões apontadas para a possível diminuição da vida útil das correias foi precisamente a mudança da marca e modelo destas com vista a uma possível redução de custos. Também o ambiente em que operam não é o mais favorável pelo que a abrasão do pó de clínquer entre as correias e polias é uma agravante de peso na degradação destes componentes.

Foi ainda posto em questão se a seleção das correias para cada ventilador seria a mais correta, tendo sido por aí que começou a análise a este problema e que mais à frente serão apresentados os resultados e conclusões que se retiraram dos estudos efetuados.

Outro problema de que é alvo este arrefecedor, e talvez o maior, é a elevada taxa de substituição de placas das suas grelhas, o que provoca constantes paragens que no extremo chegaram a

ocorrer com apenas uma semana de diferença. Para além de outros custos que uma paragem não planeada acarreta, o tempo e mão-de-obra necessários no arrefecedor para que seja reposto rapidamente o processo de fabrico e a reposição média de cerca de 34 placas por intervenção (valor médio das intervenções acompanhadas durante o estágio), com um custo médio de 135,25€ por placa, mais acessórios de fixação e consumíveis resultam em reparações com custos na ordem dos milhares de euros, podendo nas grandes reparações atingir as dezenas de milhares de euros.

Entre as razões para esta exagerada necessidade de substituição de placas estão as condições de serviço a que são expostas, como por exemplo, as elevadas temperaturas que se fazem sentir na zona de queda do clínquer aleadas à elevada abrasão provocada pelo mesmo, que é acentuada pelo constante movimento de avanço e recuo de algumas filas de placas que o permitem movimentar, e os constantes choques térmicos provocados pela extrema temperatura do clínquer de um lado da placa e o ar fresco de arrefecimento do outro, situação que é agravada pelas constantes paragens do arrefecedor não só devidas a falhas próprias mas também de outros equipamentos na linha de produção.

A junção de todas estas variáveis provocam nas placas solicitações mecânicas extremas e um desgaste tal que por vezes acontecem situações como as que estão representadas na Figura 36 imediatamente abaixo.

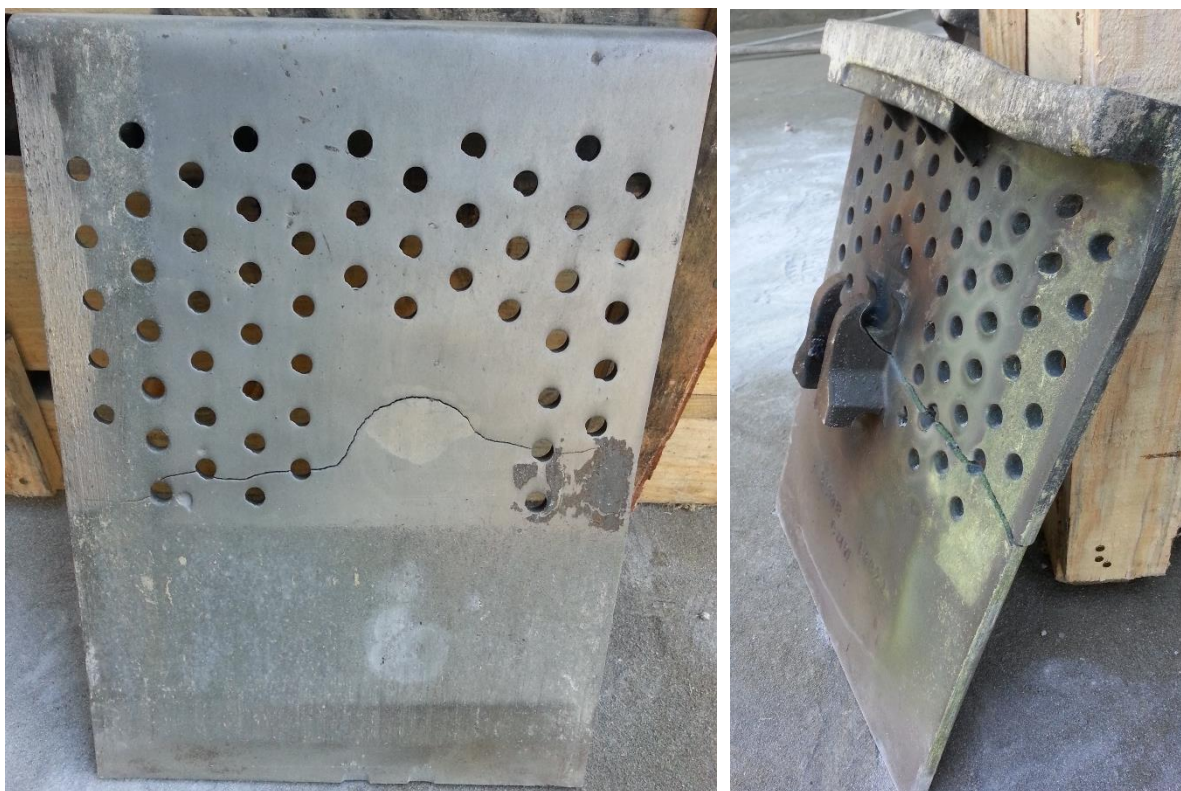


Figura 36 - Placas do Arrefecedor Substituídas

É então possível perceber pelas fotos expostas o alto nível de desgaste que as placas apresentam, conseguido observar-se perfeitamente na imagem do lado esquerdo apresentada acima a zona

da placa afetada pelo desgaste provocado pelo clínquer que fica entre as placas de diferentes filas associado ao movimento de avanço e recuo das filas de placas móveis, sendo notório na imagem uma zona em que a placa se encontra polida, resultado da abrasão que sofre, e uma outra zona com uma textura semelhante à original de uma placa nova.

Uma das consequências resultantes desta abrasão nas placas é o aumento da área dos furos das placas através dos quais o ar passa para arrefecer o clínquer e que servem também para refrigeração da própria placa, o resulta na quebra da eficácia do arrefecimento, uma vez que a perda de carga induzida pela placa ao ar quando a atravessa é deste modo reduzida, resultando numa menor capacidade de penetração na camada de clínquer por parte do ar.

Este aumento da área dos furos das placas leva também a que haja uma maior facilidade na passagem de uma gama fragmentos de clínquer de dimensões ligeiramente superiores para as câmaras de insuflação, não só pelo aumento dos furos em si, mas também porque com este aumento a pressurização que se consegue manter nas câmaras de insuflação será inferior para o mesmo caudal de ar insuflado.

Resultante do desgaste a que são sujeitas as placas é também a diminuição da sua espessura, existindo exemplos de placas em que a sua espessura original de 13 mm ficou reduzida a 8 mm em certas zonas da placa, o que representa uma redução de aproximadamente 38,5%. Como consequência desta redução, e juntamente com todos os outros fatores mencionados acima, é comum a existência de placas deformadas e fraturadas.

Alguns exemplos dessas deformações e fraturas que algumas placas sofrem são evidenciadas na Figura 37, podendo chegar-se a situações ainda mais preocupantes como é o caso da figura seguidamente ilustrada, onde está patente uma situação extrema do quão brutais podem ser as condições de serviço e consequentes falhas das placas.



Figura 37 - Exemplos de Fraturas numa Placa Substituída

Ainda no mesmo tópico, foi discutida a possível influência proveniente da afinação dos queimadores dos fornos no final do mês de Fevereiro de 2014, bem como se a própria composição das placas era a correta, isto é, se os constituintes integrantes da composição do material das placas se encontravam nas quantidades devidas.

Foi então por estas duas ultimas questões que começou por ser abordado o problema existente com o gasto incomum de placas que se vinha a verificar, e cujos resultados e conclusões serão apresentados mais à frente.

Por último, mas não menos importante, inclusivamente porque esta é uma das razões que leva ao agravamento dos problemas acima mencionados, existe um elevado esforço global de todos os intervenientes no arrefecimento do clínquer.

Para além dos esforços exercidos sobre as placas e que já foram descritos, para garantir que o clínquer sai do arrefecedor a uma temperatura aceitável existem ainda outros equipamentos e componentes aos quais são exigidos níveis de desempenho acima do esperado.

Alguns desses equipamentos são os ventiladores que insuflam o ar de arrefecimento e os seus motores. Dos 5 ventiladores utilizados para o efeito, os 3 primeiros estão a trabalhar praticamente no seu limite, com os seus motores a trabalharem acima das 1300 rpm, sendo o seu limite ligeiramente abaixo ou igual a 1500 rpm. Esta situação é particularmente alarmante no caso do primeiro ventilador que usualmente opera acima das 1450 rpm.

Por sua vez os últimos dois ventiladores, que por sinal são os de maior dimensão e que têm uma maior capacidade de insuflação, estão a trabalhar bastante abaixo da sua capacidade, estando os seus motores a operar com uma velocidade de rotação pouco acima ou até mesmo inferior a 1000 rpm.

Parte desta diferença de serviço entre os ventiladores advém da diferença de temperatura do clínquer ao longo do arrefecedor, e parte é devida às fugas existentes na chaminé do arrefecedor, que fazem com que o ventilador de extração desta esteja a aspirar “ar falso”, que entra por essas zonas de fuga, ao invés do ar de excesso do arrefecedor de clínquer, impossibilitando assim os dois últimos ventiladores de trabalhar num regime mais alto por falta de capacidade do ventilador de extração da chaminé.

Deste modo, e de maneira a garantir o arrefecimento do clínquer pretendido, é elevado o regime de trabalho dos 3 primeiros ventiladores, onde o ar que estes insuflam é utilizado como ar secundário ou para o aquecimento do petróleo de coque, sendo apenas aspirada uma quantidade residual ou nula pelo ventilador da chaminé. Como resultado deste desvio, o ar secundário poderá ter uma temperatura inferior à que seria de esperar, baixando assim o rendimento do arrefecedor.

Existe então todo o interesse em idealizar possíveis soluções por que possibilitem a atenuação deste problema, ou mesmo a sua resolução. Sendo a reparação da chaminé uma solução natural e havendo já um pedido de orçamento por parte da fábrica com esse propósito, a abordagem a esta situação foi feita de maneira diferente, tendo-se começado por efetuar um balanço térmico ao arrefecedor de clínquer como ponto de partida para a análise aqui feita.

6. REDUÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS DO ARREFECEDOR DE CLÍNQUER

Neste capítulo serão apresentados os vários estudos desenvolvidos ao longo do estágio que eventualmente permitiram esclarecer algumas das dúvidas existentes, bem como obter algumas das soluções apresentadas para os problemas identificados no capítulo anterior.

6.1. Transmissão por Correias dos Ventiladores do Arrefecedor de Clínquer

Na análise feita ao problema do decréscimo que se vinha a verificar na vida útil das correias dos ventiladores do arrefecedor, iniciou-se o estudo confirmando-se se a sua seleção estaria correta para as características dos equipamentos em que estavam aplicadas. Todos os cálculos efetuados que dizem respeito à seleção de correias foram realizados de acordo com [11].

Na tabela 2 é possível então identificar as características dos ventiladores, motores, polias e correias presentes no local, características essas que representam o ponto de partida para as seleções que se apresentam de seguida.

6.1.1. Verificação da Transmissão por Correias Existente

Por forma a começar a seleção foram estabelecidas algumas variáveis contempladas nas tabelas apresentadas no início dos cinco pontos seguintes. Nestas tabelas estão patentes o entre-eixo entre os veios do motor e do ventilador, os diâmetros primitivos das polias motora e movida, a potência do motor e a sua velocidade de rotação, para a qual se adotou o valor de 1500 rpm para todos os motores por uma questão de segurança, sendo que as rotações entre eles variam entre as 1480 e as 1500 rpm,

A seleção em si é feita seguindo os seguintes pontos:

1. Vida da correia

Seleção segundo o catálogo da vida das correias definindo o número de horas de serviço da correia entre 6000, 12000 e 25000 horas.

2. Potência de projeto

Tendo em conta as características do ventilador, do motor e do seu tipo de serviço, que no caso é contínuo, é possível através da tabela presente no anexo III retirar o fator de serviço e fazer o cálculo da potência de projeto seguindo a fórmula abaixo apresentada.

$$P_p = P_n \times k_s \quad (1)$$

Onde:

- P_p é a potência de projecto em kW.
- P_n é a potência do equipamento motor em kW.
- k_s é o factor de serviço.

3. Relação de transmissão

A relação de transmissão pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$i = \frac{D}{d} \quad (2)$$

Onde:

- i representa a relação de transmissão.
- D é o diâmetro primitivo da polia maior em mm.
- d é o diâmetro primitivo da polia menor em mm.

4. Secção da correia

Com o valor da potência de projeto já calculada e com a rotação da polia mais rápida, calculada através da fórmula abaixo exibida, podemos através do segundo gráfico presente na tabela do anexo IV seleccionar a secção da correia.

$$n_d = n_D \times i \quad (3)$$

Onde:

- n_d representa a velocidade da polia menor em rotações por minuto.
- n_D representa a velocidade da polia maior em rotações por minuto.
- i representa a relação de transmissão.

5. Diâmetro das polias

Neste ponto foram considerados os valores de diâmetro primitivo apresentados nas tabelas presentes no início do cálculo para cada ventilador.

6. Velocidade Linear

O cálculo da velocidade linear da(s) correia(s) é possível através da seguinte fórmula:

$$v = \frac{d \times n}{19100} \quad (4)$$

Onde:

- v é o valor da velocidade linear da(s) correia(s) em m/s.
- d é o diâmetro primitivo da polia com maior velocidade de rotação.
- n representa a velocidade da polia com maior velocidade de rotação em rpm.

7. Tentativa de entre-eixo e tentativa de comprimento da correia

a. Tentativa de entre-eixo

Aqui, o entre-eixo adotado foi o definido nos desenhos existentes dos ventiladores.

b. Tentativa para o comprimento da correia

O cálculo para a tentativa para o comprimento da correia é feito através da fórmula seguinte:

$$TBL = 2 \times TCD + 1,57 \times (D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \times TCD} \quad (5)$$

Onde:

- TBL representa o valor em mm da tentativa para o comprimento da correia.
- TCD é o valor da tentativa de entre-eixo em mm.
- D é o diâmetro primitivo da polia maior em mm.
- d é o diâmetro primitivo da polia menor em mm.

Com o valor resultante da fórmula anterior e consultando a tabela do anexo V é possível determinar o comprimento de correia a utilizar.

c. Entre-eixo final

Como a correia selecionada pode ter um comprimento diferente do que resultou do cálculo efetuado para a obtenção do seu comprimento, o entre-eixo tem de ser corrigido. Essa correção será efetuada através do seguinte cálculo:

$$E = \frac{F - h \times (D - d)}{2} \quad (6)$$

Onde:

- E é o valor do entre-eixo final em mm.
- O fator $F = PL - 1,57 \times (D - d)$.
 - PL é o comprimento da correia em mm.
- D é o diâmetro primitivo da polia maior.
- d é o diâmetro primitivo da polia menor.

- O fator de entre-eixo h é seleccionado da tabela do anexo VI através do valor resultante do cálculo $\frac{D-d}{F}$.

8. Número de correias

O número de correias é calculado pela seguinte fórmula:

$$Z = \frac{P_p}{(A + B + C) \times G \times C_L} \quad (7)$$

Onde:

- Z é o número de correias necessárias.
- O fator A é o valor de kW base por correia obtido através da tabela presente no anexo IX para correias SPB através do diâmetro primitivo da polia com maior velocidade de rotação e do valor da velocidade de rotação da mesma.
- O fator B é o valor de kW adicionais por correia devido à relação de transmissão e é conseguido consultando a tabela do anexo XI para correias SPB recorrendo à velocidade de rotação da polia mais rápida e da relação de transmissão entre polias.
- O fator C é o número de kW adicionados por correia consoante a vida pretendida e é calculado através das fórmulas presentes na tabela no anexo X, para correias SPB, consoante o número de horas de serviço esperados para as correias.
- O fator G é o fator de correção do ângulo de contacto e é obtido recorrendo aos valores dos diâmetros das polias e do entre-eixo através da tabela presente no anexo XIII para correias SPB.
- O fator C_L é o fator de correção do comprimento da correia e é retirado da tabela do anexo XII para correias SPB e comprimento da correia seleccionada.

9. Tolerância de instalação e tolerância de pré-tensão

Sabendo a secção das correias a utilizar e o comprimento das mesmas é possível através da tabela presente no anexo VIII as tolerâncias de instalação e de pré-tensão.

10. Força de pré-tensão necessária

O cálculo da força de pré-tensão necessária é feito através da seguinte fórmula:

$$Ts = 45 \times \frac{(2,5 - G)}{G} \times \frac{P_p}{N \times v} + M \times v^2 \quad (8)$$

Onde:

- Ts é a tensão estática em daN por correia.
- G é o fator de correção do ângulo de contacto utilizado também no cálculo do número de correias.
- N é o número de correias.
- v é a velocidade da correia em m/s.
- M é o fator retirado da tabela ilustrada no anexo VII consoante se usem correias individuais ou “PowerBand”.

11. Força necessária para verificar a pré carga

A força necessária para verificar a pré-carga é calculada através das seguintes fórmulas:

$$t = E \times \left[1 - 0,125 \times \left(\frac{D - d}{E} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Onde:

- t é o comprimento do vão da flecha em mm.
- E é o entre-eixo calculado em mm.
- D é o diâmetro primitivo da polia maior em mm.
- d é o diâmetro primitivo da polia menor em mm.

$$Deflexão = \frac{t}{100} \quad (10)$$

Onde:

- t é o comprimento do vão da flecha.

$$F_{min} = \frac{Ts + Y}{25} \quad (11)$$

$$F_{máx} = \frac{1,5 \times Ts + Y}{25} \quad (12)$$

Onde:

- F_{min} é a força de deflexão mínima recomendada em daN.
- $F_{máx}$ é a força de deflexão máxima recomendada em daN.
- Ts é a tensão estática em daN por correia daN.
- Y é o fator retirado da tabela ilustrada no anexo VII.

6.1.1.1 Ventilador 1

Tabela 4 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 1

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 48 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1633 mm</i>
$D = 236 \text{ mm}$
$d = 224 \text{ mm}$

1. Vida da correia

Seleção para uma vida de 25000 horas e 12000 horas.

2. Potência de projeto

Neste caso o k_s resultante é 1,4. Assim, podemos então calcular a potência de projeto:

$$P_p = 75 \times 1,4 = 105 \text{ kW}$$

3. Relação de transmissão

$$i = \frac{236}{224} = 1,054$$

4. Secção da correia

$$P_p = 105 \text{ kW}$$

$$n_d = 1500 \times 1,054 = 1581 \text{ rpm}$$

Neste caso, a secção obtida foi a SPB.

5. Diâmetro das polias

Para o diâmetro das polias foram considerados os já existentes e que foram indicados na tabela 4.

$$D = 236$$

$$d = 224$$

6. Velocidade linear

$$v = \frac{224 \times 1581}{19100} = 18,5416 \text{ m/s}$$

7. Tentativa de entre-eixo e tentativa de comprimento da correia

a. Tentativa de entre-eixo fixo

$$TCD = 1633 \text{ mm}$$

b. Tentativa de comprimento da correia

$$TBL = 2 \times 1633 + 1,57 \times (236 + 224) + \frac{(236 - 224)^2}{4 \times 1633} = 3988,22 \text{ mm}$$

Com o comprimento da correia calculado, e sabendo previamente que a secção da correia teria de ser SPB é possível determinar através da tabela do anexo V o modelo de correia a ser utilizada é a SPB-4000.

c. Entre-eixo final

$$F = 4000 - 1,57 \times (236 + 224) = 3277,8 \text{ mm}$$

$$\frac{236 - 224}{3277,8} = 0,004 \Rightarrow h = 0,002$$

$$E = \frac{3277,8 - 0,004 \times (236 - 224)}{2} = 1638,88 \text{ mm}$$

8. Número de correias

a. Para uma vida de 25000 horas

Tabela 5 - Fatores para o Cálculo do N° de Correias para uma Vida de 25000 horas

<i>Fator A</i>	15,767
<i>Fator B</i>	0,3162
<i>Fator C</i>	0
<i>Fator C_L</i>	1,04
<i>Fator G</i>	0,99927

$$Z = \frac{105}{(15,767 + 0,3162 + 0) \times 0,99927 \times 1,04} = 6,282 \Rightarrow N = 7$$

b. Para uma vida de 12000 horas

Tabela 6 - Fatores para o Cálculo do N° de Correias para uma Vida de 12000 horas

<i>Fator A</i>	15,767
<i>Fator B</i>	0,3162
<i>Fator C</i>	1,548
<i>Fator C_L</i>	1,04
<i>Fator G</i>	0,99927

$$Z = \frac{105}{(15,767 + 0,3162 + 1,548) \times 0,99927 \times 1,04} = 5,73 \Rightarrow N = 6$$

9. Tolerâncias de instalação e tolerâncias de pré-tensão

Secção SPB e PL=4000 mm.

a. Para uma vida de 25000 horas

$$T_{\text{instalação}} = 25 \text{ mm}$$

$$T_{\text{pré-tensão}} = 55 \text{ mm}$$

b. Para uma vida de 12000 horas

$$T_{\text{instalação}} = 25 \text{ mm}$$

$$T_{\text{pré-tensão}} = 55 \text{ mm}$$

10. Força de pré-tensão necessária

Secção SPB $\Rightarrow M=0,017$

a. Para uma vida de 25000 horas

$$Ts = 45 \times \frac{(2,5 - 0,99927)}{0,99927} \times \frac{105}{7 \times 18,5416} + 0,017 \times 18,5416^2 = 60,52 \text{ daN/correia}$$

b. Para uma vida de 12000 horas

$$Ts = 45 \times \frac{(2,5 - 0,99927)}{0,99927} \times \frac{105}{6 \times 18,5416} + 0,017 \times 18,5416^2 = 69,63 \text{ daN/correia}$$

11. Força necessária para verificar a pré-carga

Secção SPB $\Rightarrow Y=2,6$

a. Para uma vida de 25000 horas

$$t = 1638,88 \times \left[1 - 0,125 \times \left(\frac{236 - 224}{1638,88} \right)^2 \right] = 1638,87 \text{ mm}$$

$$\text{Deflexão} = \frac{1638,37}{100} = 16,39 \text{ mm}$$

$$F_{\min} = \frac{60,52 + 2,6}{25} = 2,5248 \text{ daN/correia}$$

$$F_{\max} = \frac{1,5 \times 60,52 + 2,6}{25} = 3,735 \text{ daN/correia}$$

b. Para uma vida de 12000 horas

$$t = 1638,88 \times \left[1 - 0,125 \times \left(\frac{236 - 224}{1638,88} \right)^2 \right] = 1638,87 \text{ mm}$$

$$\text{Deflexão} = \frac{1638,37}{100} = 16,39 \text{ mm}$$

$$F_{\min} = \frac{69,63 + 2,6}{25} = 2,889 \text{ daN/correia}$$

$$F_{m\acute{a}x} = \frac{1,5 \times 69,63 + 2,6}{25} = 4,28 \text{ daN/correia}$$

6.1.1.2 Ventilador 2

Tabela 7 – Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 2

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 48 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1334 mm</i>
$D = 400 \text{ mm}$
$d = 280 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para o ventilador 2.

Tabela 8 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 2

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1,43	1,43
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	2145	2145
v [m/s]	31,45	31,45
TCD [mm]	1334	1334
TBL [mm]	3738,3	3738,3
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1339,85	1339,85
N	4	4
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	74,007	74,007
t [mm]	1338,51	1338,51
<i>Deflexão</i> [mm]	13,39	13,39
F_{min} [daN/correia]	3,064	3,064
$F_{máx}$ [daN/correia]	4,54	4,54

No ponto 6 da seleção, velocidade obtida ultrapassa os 30 m/s máximos recomendados no catálogo, mas como o motor raramente atinge a sua velocidade limite para a qual esta seleção foi realizada, esta ligeira diferença não deverá representar um problema.

6.1.1.3 Ventilador 3

Tabela 9 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 3

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 50 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1318 mm</i>
$D = 400 \text{ mm}$
$d = 300 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para o ventilador 3.

Tabela 10 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 3

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1,33	1,33
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	1995	1995
v [m/s]	31,34	31,34
TCD [mm]	1318	1318
TBL [mm]	3736,9	3736,9
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1324,5	1324,5
N	4	4
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	73,994	73,994
t [mm]	1323,56	1323,56
<i>Deflexão</i> [mm]	13,24	13,24
F_{min} [daN/correia]	3,06	3,06
$F_{máx}$ [daN/correia]	4,54	4,54

No ponto 6, a velocidade obtida ultrapassa os 30 m/s máximos recomendados no catálogo, mas como o motor raramente atinge a sua velocidade limite para a qual esta seleção foi realizada, esta ligeira diferença não deverá representar um problema.

6.1.1.4 Ventilador 4

Tabela 11 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 4

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 59 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1488 mm</i>
$D = 250 \text{ mm}$
$d = 236 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para o ventilador 4.

Tabela 12 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 4

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1,06	1,06
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	1590	1590
v [m/s]	19,65	19,65
TCD [mm]	1488	1488
TBL [mm]	3739,05	3739,05
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1493,47	1493,47
N	6	6
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	66,779	66,779
t [mm]	1493,45	1493,45
<i>Deflexão</i> [mm]	14,93	14,93
F_{min} [daN/correia]	2,775	2,775
$F_{máx}$ [daN/correia]	4,11	4,11

6.1.1.5 Ventilador 5

Tabela 13 - Condições Iniciais para a Seleção de Verificação da Transmissão do Ventilador 1

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 51 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1205 mm</i>
$D = 500 \text{ mm}$
$d = 500 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para o ventilador 5.

Tabela 14 - Resultados da Seleção de Verificação para o Ventilador 5

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1	1
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	1500	1500
v [m/s]	39,27	39,27
TCD [mm]	1205	1205
TBL [mm]	3980	3980
<i>Correia</i>	SPC-4000	SPC-4000
E [mm]	1215	1215
N	2	2
$T_{instalação}$ [mm]	35	35
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	139,589	139,589
t [mm]	1215	1215
<i>Deflexão</i> [mm]	12,15	12,15
F_{min} [daN/correia]	5,748	5,748
$F_{máx}$ [daN/correia]	8,54	8,54

No ponto 6, a velocidade obtida ultrapassa largamente os 30 m/s máximos recomendados no catálogo, mas como o motor raramente atinge a sua velocidade limite para a qual esta seleção foi realizada esta diferença poderá não representar um problema, sendo ainda este tópico discutido mais à frente.

Embora no ponto 4 se tivesse obtido como resultado uma correia SPB-4000, neste caso em particular, o fator A retirado da tabela do anexo IV não existe no catálogo para polias de 500 mm associadas a correias com secção SPB, assim, foi assumida a partir desse ponto a secção acima da SPB, a SPC, para os restantes cálculos mantendo-se o comprimento de 4000 mm, valor retirado a partir do anexo XIV. Os fatores A, B, C, C_L e G para correias SPC foram então retirados dos anexos XV a XIX.

6.1.1.6 Ilações Retiradas

Tabela 15 – Comparação entre o que está Instalado no Local e os Resultados das Seleções de Verificação

<i>Ventilador</i>	<i>Instalado no local</i>	<i>Seleção para 25000 horas</i>	<i>Seleção para 12000 horas</i>
<i>Ventilador 1</i>	D= 236 mm d= 224 mm 6 Correias SPB-4000	D= 236 mm d= 224 mm 7 Correias SPB-4000	D= 236 mm d= 224 mm 6 Correias SPB-4000
<i>Ventilador 2</i>	D= 400 mm d= 280 mm 4 Correias SPB-3750	D= 400 mm d= 280 mm 4 Correias SPB-3750	D= 400 mm d= 280 mm 4 Correias SPB-3750
<i>Ventilador 3</i>	D= 400 mm d= 300 mm 4 Correias SPB-3750	D= 400 mm d= 300 mm 4 Correias SPB-3750	D= 400 mm d= 300 mm 4 Correias SPB-3750
<i>Ventilador 4</i>	D= 250 mm d= 236 mm 6 Correias SPB-3750	D= 250 mm d= 236 mm 6 Correias SPB-3750	D= 250 mm d= 236 mm 6 Correias SPB-3750
<i>Ventilador 5</i>	D= 500 mm d= 500 mm 4 Correias SPA-4000	D= 500 mm d= 500 mm 2 Correias SPC-4000	D= 500 mm d= 500 mm 2 Correias SPC-4000

Analisando agora a tabela 15 é possível perceber que para a seleção de 25000 horas os ventiladores 2, 3 e 4 confirmam o que está instalado no local, já o ventilador 1 necessita de mais uma correia que as que estão instaladas e no caso do ventilador 5 existem diferenças na secção de correia que passou de SPA a SPC e no número de correias que passaram de 4 a 2.

Já na seleção feita para 12000 horas, à exceção do ventilador 5 que apresenta as mesmas diferenças que já foram referidas, a seleção feita para todos os outros ventiladores corresponde à realidade das correias que estão instaladas no local.

As diferenças mencionadas para o ventilador 5 podem simplesmente existir por falta de soluções do catálogo utilizado para a seleção no que toca à combinação entre correias e polias, e tendo em conta que este ventilador é dos menos problemáticos, estando a trabalhar perfeitamente com as 4 correias SPA, estas diferenças não se deverão revelar um problema.

Também a velocidade linear excessiva que se faz notar na seleção para o ventilador 5 não deverá representar um problema, uma vez que como já foi referido, este ventilador é dos menos

problemáticos, muito possivelmente porque também funciona num regime bastante baixo, raramente ultrapassando as 1100 rpm, o que resulta numa velocidade linear de 28,8 m/s para as correias deste ventilador, que se revela abaixo dos 30 m/s máximos recomendados.

No caso da velocidade linear ligeiramente acima dos 30 m/s dos ventiladores 2 e 3, com velocidades médias de rotação da polia mais rápida de 1859 rpm e 1941,8 rpm respetivamente, o resultado é uma velocidade linear no ventilador 2 de 27,25 m/s, abaixo do recomendado, e no ventilador 3 de 30,5 m/s, ficando muito pouco acima do recomendado. Assim, também aqui a velocidade linear não se deverá apresentar como um problema de grande relevância.

Apesar das diferenças na seleção do ventilador 5, onde uma possível causa para tal acontecimento foi também já referida, pode-se de um modo geral dizer que foi confirmada a boa aplicação do material instalado no local para uma vida útil esperada de 12000 horas de serviço para as correias.

Assim, a maior causa para o decréscimo da vida de serviço das correias poderá realmente ter sido a mudança de marca e modelo das correias, causa esta que foi já identificada no capítulo 5.

Posto isto, foi então o momento de fazer um novo estudo com o objetivo de tentar atenuar este impacto que poderá ter sido realmente causado pela mudança mencionada, bem como, alcançar de alguma forma uma possível redução dos custos inerentes a estes equipamentos e que a fábrica tem de suportar.

6.1.2. Otimização da Transmissão por Correias

Para esta seleção foi seguido o mesmo método utilizado anteriormente. No início de cada seleção é ainda feita uma breve introdução ao porquê das medidas e valores que foram adotados e utilizados, sendo também realizada uma breve interpretação dos resultados obtidos no final de cada seleção.

Após algumas tentativas, os resultados para os ventiladores que foram então alvo de uma nova seleção de correias são apresentados de seguida.

6.1.2.1 Ventilador 1

Dada a semelhança entre a transmissão dos ventiladores 1 e 4, e uma vez que na seleção feita para o ventilador 4 eram necessárias as mesmas 6 correias para garantir tanto as 12000 como as 25000 horas de serviço, ao contrário do que aconteceu na seleção do ventilador 1 onde eram necessárias 7 correias para garantirem 25000 horas de serviço e 6 para garantirem 12000 horas de vida útil para as correias, havia então todo o interesse tentar fazer a adaptação da transmissão presente no ventilador 4 também para o ventilador 1.

Assim, a seleção de correias para feita para o ventilador 1 é a que se encontra abaixo representada, baseada nos dados iniciais que foram adotados e que se encontram na tabela 11.

Tabela 16 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 1

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 48 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1488 mm</i>
$D = 250 \text{ mm}$
$d = 236 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para a seleção de otimização do ventilador 1.

Tabela 17 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 1

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1,06	1,06
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	1590	1590
v [m/s]	19,65	19,65
TCD [mm]	1488	1488
TBL [mm]	3739,05	3739,05
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1493,47	1493,47
N	6	6
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	66,779	66,779
t [mm]	1493,45	1493,45
<i>Deflexão</i> [mm]	14,93	14,93
F_{min} [daN/correia]	2,775	2,775
$F_{máx}$ [daN/correia]	4,11	4,11

As diferenças entre a seleção de otimização aqui feita e a previamente executada para confirmação podem ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 18 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização

	<i>Instalado no Local e Confirmado para 12000 horas</i>	<i>Seleção de Verificação para 25000 horas</i>	<i>Seleção de Otimização para 12000 e 25000 horas</i>
<i>D</i>	236 mm	236 mm	250 mm
<i>d</i>	224 mm	224 mm	236 mm
<i>i</i>	1,054	1,054	1,06
<i>Entre-Eixo</i>	1638,88 mm	1638,88 mm	1493,47 mm
<i>Correias</i>	6 Correias SPB-4000	7 Correias SPB-4000	6 Correias SPB-3750

Analisando agora a tabela 18, é possível perceber que embora as dimensões das polias tenham aumentado o resultado final é uma relação de transmissão apenas 0,7% superior à atual, o que não deverá representar um desequilíbrio no conjunto.

Já a redução do comprimento das correias, situação que será explicada e discutida mais à frente, resulta na redução do entre-eixo em cerca de 145,41 mm, o que a nível de ajustes não representa um problema. O equilíbrio do conjunto também não deverá ser afetado dado que estes são os resultados da seleção feita, embora na vida real nem sempre tudo é assim tão linear.

6.1.2.2 Ventilador 3

Mais uma vez, as semelhanças entre as transmissões e agora também na própria dos ventiladores, sendo estes dois os ventiladores com capacidades de insuflação mais próxima entre os 5 ventiladores de insuflação, foram as razões que levaram à intervenção neste ventilador e à adaptação da transmissão do ventilador 2 para o 3. O porquê de ter sido feita uma nova seleção para o ventilador 3 e não para o 2 é explicada mais à frente na proposta final da seleção de correias.

Posto isto, a seleção final considerada para o ventilador 3 é a que se segue, baseada nos valores admitidos inicialmente e que estão presentes na tabela 7.

Tabela 19 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 3

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 50 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1334 mm</i>
$D = 400 \text{ mm}$
$d = 280 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para a seleção de otimização do ventilador 3.

Tabela 20 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 3

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1,43	1,43
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	2145	2145
v [m/s]	31,45	31,45
TCD [mm]	1334	1334
TBL [mm]	3738,3	3738,3
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1339,85	1339,85
N	4	4
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	74,007	74,007
t [mm]	1338,51	1338,51
<i>Deflexão</i> [mm]	13,39	13,39
F_{min} [daN/correia]	3,064	3,064
$F_{máx}$ [daN/correia]	4,54	4,54

Novamente no ponto 6 a velocidade aqui obtida ultrapassa os 30 m/s máximos recomendados no catálogo, mas como o motor raramente atinge a sua velocidade limite para a qual esta seleção foi realizada, esta ligeira diferença não deverá representar um problema.

As diferenças entre a seleção de otimização aqui feita e a executada anteriormente para confirmação podem ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 21 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização

	<i>Instalado no Local e Verificado para 12000e 25000 Horas</i>	<i>Seleção de Otimização para 12000 e 25000 horas</i>
<i>D</i>	400 mm	400 mm
<i>d</i>	300 mm	280 mm
<i>i</i>	1,33	1,43
<i>Entre-Eixo</i>	1324,5 mm	1339,85 mm
<i>Correias</i>	4 Correias SPB-3750	4 Correias SPB-3750

Olhando agora para a tabela 21 é possível observar que desta nova seleção resultou uma relação de transmissão 7,5% superior à da transmissão que está instalada, o que não deverá um problema devido às semelhanças já existentes entre os ventiladores e as suas transmissões, e terá inclusivamente um benefício no desempenho do ventilador que será debatido mais à frente na proposta final.

Há ainda um ligeiro aumento de 15,35 mm no entre-eixo, o que não deverá dar origem a nenhum problema quer nos ajustes que terão de ser feitos quer no funcionamento do ventilador.

6.1.2.3 Ventilador 5

Esta nova seleção para o ventilador 5 foi feita com o objetivo de mudar a secção e o comprimento das correias utilizadas com o propósito de uniformizar as correias utilizadas nos ventiladores do arrefecedor.

Para dar início à seleção que se segue, foram tidos em conta e assumidos os valores que estão presentes na tabela 22.

Tabela 22 - Condições Iniciais para a Seleção de Otimização da Transmissão do Ventilador 5

$P_{motor} = 75 \text{ kW}$
$P_{ventilador} = 50 \text{ kW}$
<i>Serviço Contínuo (24 horas)</i>
$n_D = 1500 \text{ rpm}$
<i>Entre-eixo = 1050 mm</i>
$D = 500 \text{ mm}$
$d = 500 \text{ mm}$

Seguindo os mesmos passos expostos no ponto 6.1. e demonstrados com uma seleção no ponto 6.1.1. resultam os valores expostos na tabela imediatamente abaixo, para a seleção de otimização do ventilador 5.

Tabela 23 - Resultados da Seleção de Otimização para o Ventilador 5

	25000 horas	12000 horas
P_p [kW]	105	105
i	1	1
n_D [rpm]	1500	1500
n_d [rpm]	1500	1500
v [m/s]	39,27	39,27
TCD [mm]	1050	1050
TBL [mm]	3670	3670
<i>Correia</i>	SPB-3750	SPB-3750
E [mm]	1090	1090
N	3	3
$T_{instalação}$ [mm]	25	25
$T_{pré-tensão}$ [mm]	55	55
T_s [daN/correia]	86,38	86,38
t [mm]	1090	1090
<i>Deflexão</i> [mm]	10,9	10,9
F_{min} [daN/correia]	3,56	5,748
$F_{máx}$ [daN/correia]	5,29	8,54

A velocidade aqui obtida ultrapassa largamente os 30 m/s máximos recomendados no catálogo, mas como o motor raramente atinge a sua velocidade limite para a qual esta seleção foi realizada esta diferença poderá não representar um problema, sendo ainda este tópico discutido mais à frente.

Neste caso tal como aconteceu na seleção previamente executada para este ventilador no ponto 8, o fator A retirado da tabela do anexo IV não existe no catálogo para polias de 500 mm associadas a correias com secção SPB, embora existam polias dessa dimensão para correias SPB no mercado e até o mesmo catálogo recomende o seu uso com correias desta secção, como pode ser observado na tabela do anexo XX.

Assim, o fator A adotado para o cálculo do número de correias nesta seleção foi de 35,5. Este valor foi assumido com base na diferença que se verifica para o fator A entre polias com 100 mm de diferença no seu diâmetro para a mesma rotação de 1500 rpm, onde por cada 100 mm a mais de diferença no diâmetro a diferença no fator A é reduzida em aproximadamente 2,1 unidades.

Por exemplo, para este caso, a diferença do fator A entre os diâmetros de 300 e 200 mm é de 9,7 e entre os de 400 e 300 mm é de 7,6. Assim, a diferença do fator A entre os diâmetros de 500 e 400 mm será a soma do fator A para uma polia de 400 mm mais a diferença resultante os fatores A das polias de 400 e 300 mm ao qual é subtraído o valor de 2,1.

Sendo 30 o valor do fator A para uma polia de 400 mm, basta então somar-lhe o valor resultante da diferença entre os fatores A das polias de 400 e 300 mm que é 7,6 e ao qual é subtraído o valor de 2,1. Assim o valor assumido para o fator A da polia de 500 mm será igual a $30 + (7,6 - 2,1) = 35,5$.

As diferenças entre a seleção de otimização aqui feita, a executada anteriormente para confirmação e o que está presente no local podem ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 24 - Comparação entre o que está Instalado no Local e as Seleções de Verificação e de Otimização

	<i>Instalado no Local</i>	<i>Seleção de Verificação para 12000 e 25000 Horas</i>	<i>Seleção de Otimização para 12000 e 25000 horas</i>
<i>D</i>	500 mm	500 mm	500 mm
<i>d</i>	500 mm	500 mm	500 mm
<i>i</i>	1	1	1
<i>Entre-Eixo</i>	1205 mm	1215 mm	1090 mm
<i>Correias</i>	4 Correias SPA 4000	2 Correias SPC-4000	3 Correias SPB-3750

Examinando agora a tabela 24 são notórias as diferenças não só entre o que está instalado no local e as seleções feitas, mas também entre as próprias seleções.

As mudanças estão então na quantidade no tipo utilizado e no comprimento das correias, que passaram de uma secção SPA para uma SPB e reduziram o seu comprimento de 4000 para 3750 mm. Esta redução no comprimento das correias resulta ainda na natural redução da distância de entre-eixo entre o veio do motor e o do ventilador de 1205 para 1090 mm, o que não se deverá apresentar como um problema.

Com estas características foi então alcançado o objetivo pretendido de adaptar no ventilador 5 correias iguais às utilizadas nos outros ventiladores.

O único problema que poderá advir desta seleção será o do cálculo do fator A explicado anteriormente, embora o resultado para o número de correias final não pareça descabido, até porque se repararmos, nos três casos apresentados na tabela 24 consoante vai aumentando a secção das correias existe uma necessidade de um menor número destas, o que corresponde à realidade.

Posto isto, e não havendo acesso a outro catálogo que permitisse a seleção de correias como a que aqui foi apresentada, só um teste real comprovará se as escolhas e opções aqui tomadas foram as acertadas.

6.1.2.4 Proposta Final

Realizadas todas as seleções necessárias, quer as de despiste para confirmar se o que está instalado no local é o correto quer as que foram feitas para a otimização, a solução final aqui proposta para as transmissões dos cinco ventiladores que insuflam o ar que faz o arrefecimento do clínquer é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 25 - Tabela com a Proposta Final para as Transmissões dos 5 Ventiladores

	<i>Ventilador 1</i>	<i>Ventilador 2</i>	<i>Ventilador 3</i>	<i>Ventilador 4</i>	<i>Ventilador 5</i>
<i>D</i>	250 mm	400 mm	400 mm	250	500 mm
<i>d</i>	236 mm	280 mm	280 mm	236	500 mm
<i>i</i>	1,06	1,43	1,43	1,06	1
<i>n_D</i>	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm
<i>n_d</i>	1590 rpm	2145 rpm	2145 rpm	1590 rpm	1500 rpm
<i>Entre-Eixo</i>	1493,47 mm	1339,85 mm	1339,85 mm	1493,47 mm	1090 mm
<i>Correias</i>	6 Correias SPB 3750	4 Correias SPB 3750	4 Correias SPB- 3750	6 Correias SPB 3750	3 Correias SPB- 3750

O estudo da solução final aqui apresentada foi feito com o propósito de atingir os vários objetivos que são enumerados seguidamente:

- A maior uniformização possível dos materiais utilizados nas transmissões dos ventiladores, sem lhes alterar em demasia as suas características, com vista a uma redução de custos de *stock* em armazém e também à diminuição da variedade de materiais necessários na manutenção dos equipamentos, facilitando assim as intervenções dos trabalhadores;

- Uma redução do custo geral em material inerente à mudança das transmissões dos ventiladores;
- O aumento do tempo de serviço das correias.

De seguida, são apresentados nas tabelas 26 e 27 os custos dos materiais associados à mudança das transmissões dos 5 ventiladores, uma expõe os custos antes da otimização efetuada e a outra contempla os custos que passam a ser suportados com a implementação da seleção final de otimização proposta.

Tabela 26 - Materiais e seus Custos Associados para as Transmissões Instaladas de Momento

	<i>Material</i>	<i>Unidades</i>	<i>Preço Unitário [€]</i>	<i>Preço [€]</i>
<i>Ventilador 1</i>	Polia 6 Gornes SPB	1	38,88	38,88
	Polia 6 Gornes SPB	1	35,49	35,49
	Correia Trapezoidal	6	7,195	43,17
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	11,04	11,04
<i>Ventilador 2</i>	Polia 4 Gornes SPB	1	71,91	71,91
	Polia 4 Gornes SPB	1	30,66	30,66
	Correia Trapezoidal	4	6,97	27,88
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
<i>Ventilador 3</i>	Polia 4 Gornes SPB	1	71,91	71,91
	Polia 4 Gornes SPB	1	39,3	39,3
	Correia Trapezoidal	4	6,97	27,88
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
<i>Ventilador 4</i>	Polia 6 Gornes SPB	1	41	41
	Polia 6 Gornes SPB	1	38,88	38,88
	Correia Trapezoidal	6	6,97	41,82
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	10,83	10,83
<i>Ventilador 5</i>	Polia 4 Gornes SPA	2	70	140
	Correia Trapezoidal	4	8,27	33,08
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
<i>Total (€)</i>				768,45

Tabela 27 - Materiais e seus Custos Associados à Proposta da Otimização das Transmissões

	<i>Material</i>	<i>Unidades</i>	<i>Preço Unitário [€]</i>	<i>Preço [€]</i>
<i>Ventilador 1</i>	Polia 6 Gornes SPB	1	41	41
	Polia 6 Gornes SPB	1	38,88	38,88
	Correia Trapezoidal	6	6,97	41,82
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	11,04	11,04
<i>Ventilador 2</i>	Polia 4 Gornes SPB	1	71,91	71,91
	Polia 4 Gornes SPB	1	30,66	30,66
	Correia Trapezoidal	4	6,97	27,88
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
<i>Ventilador 3</i>	Polia 4 Gornes SPB	1	71,91	71,91
	Polia 4 Gornes SPB	1	30,66	30,66
	Correia Trapezoidal	4	6,97	27,88
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	5,5	5,5
<i>Ventilador 4</i>	Polia 6 Gornes SPB	1	41	41
	Polia 6 Gornes SPB	1	38,88	38,88
	Correia Trapezoidal	6	6,97	41,82
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	10,83	10,83
<i>Ventilador 5</i>	Polia 3 Gornes SPB	2	67,3	134,6
	Correia Trapezoidal	4	6,97	20,91
	Bucha T/Lock	1	10,68	10,68
	Bucha T/Lock	1	10,38	10,38
<i>Total (€)</i>				756,46

A seleção dos *Taper Lock* indicados em ambas as tabelas foi efetuada segundo [4], e os preços dos componentes foram obtidos através do *software* interno que controla as entradas e saídas de armazém ou facultados pela secção de compras da CMP.

Comparando agora as tabelas 26 e 27 acima representadas é possível concluir que o primeiro objetivo de uniformização do material utilizado nas transmissões dos ventiladores foi atingindo, sendo que foram reduzidas a uma as três correias que eram previamente utilizadas, verificando-

se também que passaram a ser utilizadas cinco tipos de diferentes polias ao invés dos sete que eram utilizados anteriormente e foram ainda reduzidos de cinco para quatro os *Taper Lock* utilizados para fixar as polias.

Com estas reduções nos componentes utilizados nas transmissões dos cinco ventiladores de insuflação de ar para arrefecimento do clínquer consegue-se também diminuir os custos e o espaço que o material ocupa em armazém caso seja pretendido.

Esta diminuição é então possível pela partilha de componentes que as transmissões têm agora, por exemplo, anteriormente se houvesse apenas um jogo de uma transmissão para o ventilador 1 só poderia ser aplicado nesse ventilador, à exceção da polia de 250 mm que poderia também ser usada na transmissão do ventilador 4, agora todo esse jogo pode ser aplicado tanto no ventilador 1 como no 4, e o mesmo se passa para os ventiladores 2 e 3 que partilham agora a mesma transmissão. Já o ventilador 5 passa agora também a utilizar correias com a mesma secção e comprimento que todos os outros, tendo-lhe sido reduzida uma correia e passando a utilizar três ao invés das quatro.

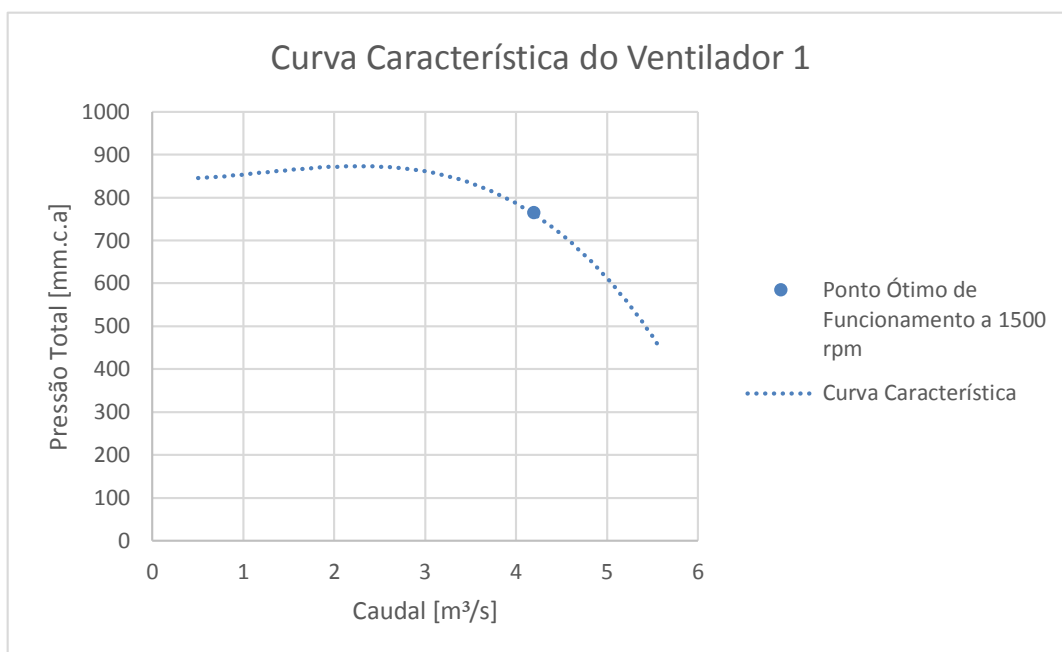
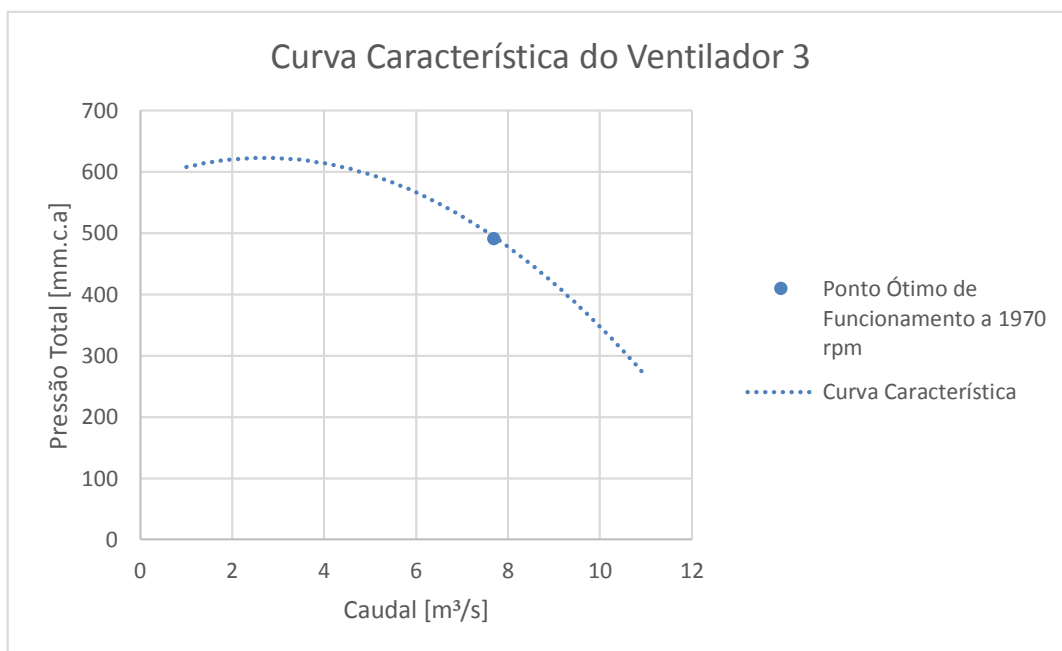
Com tudo isto é ainda facilitado o processo de manutenção a estes equipamentos, uma vez que reduzida a quantidade de material há menos suscetibilidade à ocorrência de erros que envolvam dúvidas nos componentes a usar ou até mesmo trocas de componentes entre transmissões, rentabilizando também assim o tempo de duração das intervenções dos trabalhadores.

Analisando ainda as tabelas 26 e 27 é possível verificar que o objetivo de reduzir o custo geral associado a uma mudança das transmissões dos cinco ventiladores foi atingido, ainda que por uma margem baixa de 11,99€.

Quanto ao aumento do tempo de serviço das correias poderá aqui ser conseguido nos ventiladores 1 e 3, resultado do aumento da relação de transmissão nestes ventiladores, ainda que este tenha sido muito ligeiro no caso do ventilador 1.

Neste caso, ao aumentar a relação de transmissão estamos consequentemente a aumentar a rotação da polia movida mantendo constante a rotação da polia motora, o que se traduzirá numa menor velocidade de rotação do motor para atingir as mesmas velocidades de rotação do ventilador antes de ter sido ampliada a relação de transmissão.

Mantendo-se o ventilador intacto, o aumento da velocidade de rotação máxima da polia movida eleva assim a gama de rotações em que os ventiladores podem trabalhar, aumentando-lhe também o seu caudal máximo de insuflação.

**Figura 38 - Curva Característica do Ventilador 1****Figura 39 - Curva Característica do Ventilador 3**

Olhando para as Figuras 38 e 39 acima representadas, que correspondem às curvas características dos ventiladores 1 e 3, é então possível depreender a vantagem que o aumento da velocidade de rotação da polia movida que se traduz num aumento do caudal que se consegue insuflar representa inflige uma acção negativa na pressão total, resultando numa possível diminuição da capacidade de penetração do ar na camada de clínquer. Deste modo, fica a cargo

dos operadores que controlam a linha de produção a utilização de uma maior ou menor rotação dos ventiladores com base nas condições em que estão a operar naquele momento.

Por fim, este aumento da gama de rotações do ventilador deverá fazer-se notar no aumento da vida de serviço das correias e numa diminuição do consumo de energia por parte dos motores, uma vez que agora será possível com uma menor rotação dos motores atingir os mesmos valores de caudal insuflado antes da otimização aqui feita.

Em último lugar, é ainda relevante mencionar que o regresso à utilização do modelo e marca de correias que eram utilizadas anteriormente às que têm vindo a ser utilizadas ultimamente teria todo o interesse e proveito para a fábrica, ainda que o seu preço seja um pouco mais elevado, tendo em conta que na realidade têm uma duração superior às utilizadas de momento.

6.2. Otimização das Placas das Grelhas do Arrefecedor de Clínquer

6.2.1. Análise da Influência da Composição Química das Placas na sua Elevada Taxa de Substituição

Como foi referido anteriormente no capítulo 5, a abordagem a este problema começou por uma confirmação da composição química dos aços fundidos refratários das placas utilizadas nas grelhas do arrefecedor de clínquer, fazendo assim um despiste da possível influência de um aço que não respeitasse os parâmetros estabelecidos no problema da substituição excessiva de placas.

Para que esta análise fosse possível foi elaborada a tabela presente no anexo XXI recorrendo [23] para a obtenção da composição das ligas existentes nas placas. Nesta tabela estão patentes os códigos internos das placas acompanhados da liga que lhes corresponde e da sua composição. A tabela do anexo XXI está ainda preenchida com o exemplo da confirmação que foi feita para algumas das placas utilizadas nas grelhas do arrefecedor de clínquer que se encontravam em armazém, não tendo sido possível efetuar outras medições por falta de disponibilidade do equipamento utilizado para as medições.

A análise química não destrutiva à composição dos aços ficou então a cargo de um equipamento que recorre a uma tecnologia de fluorescência de raios-x para determinar a composição e a percentagem de cada elemento de liga presente no material que está a ser analisado, precisando apenas de alguns segundos para o fazer. O equipamento é um analisador de liga portátil da marca NITON cujo modelo é o XLt.



Figura 40 - Analisador de Liga NITON XLt

Como já foi referido anteriormente a análise efetuada está retratada na tabela do anexo XXI, sendo possível através do estudo dos dados presentes nela assumir que as composições das ligas estão globalmente dentro dos parâmetros estabelecidos, não devendo portanto ser uma das causas que leva à anormal substituição de placas.

6.2.2. Estudo da Influência da Ajustagem dos Queimadores na Anormal Taxa de Substituição de Placas

Feito o despiste da interferência da composição química das placas na sua elevada taxa de substituição, chegou a vez de apurar se as ajustes feitas nos queimadores dos fornos teriam de alguma forma representado um efeito de alavanca na substituição de placas anormal que se vinha a verificar.

Para que esta análise fosse possível, e sabendo que estas ajustes tiveram lugar no final do mês de Fevereiro do ano 2014, foi feito um levantamento da saída de placas de armazém para serem instaladas no arrefecedor de clínquer antes e depois de Fevereiro de 2014

Do tratamento dos dados recolhidos referentes às mudanças de placas antes e depois de Fevereiro de 2014 resultaram os gráficos que se apresentam de seguida. Para facilitar a perceção destes dados internamente, no gráfico imediatamente abaixo representado, as placas estão representadas pelos códigos de material que as identificam na fábrica, sendo possível fazer a associação entre os códigos e as placas correspondentes pode ser feita através da tabela 3 presente no ponto 4.2.1.

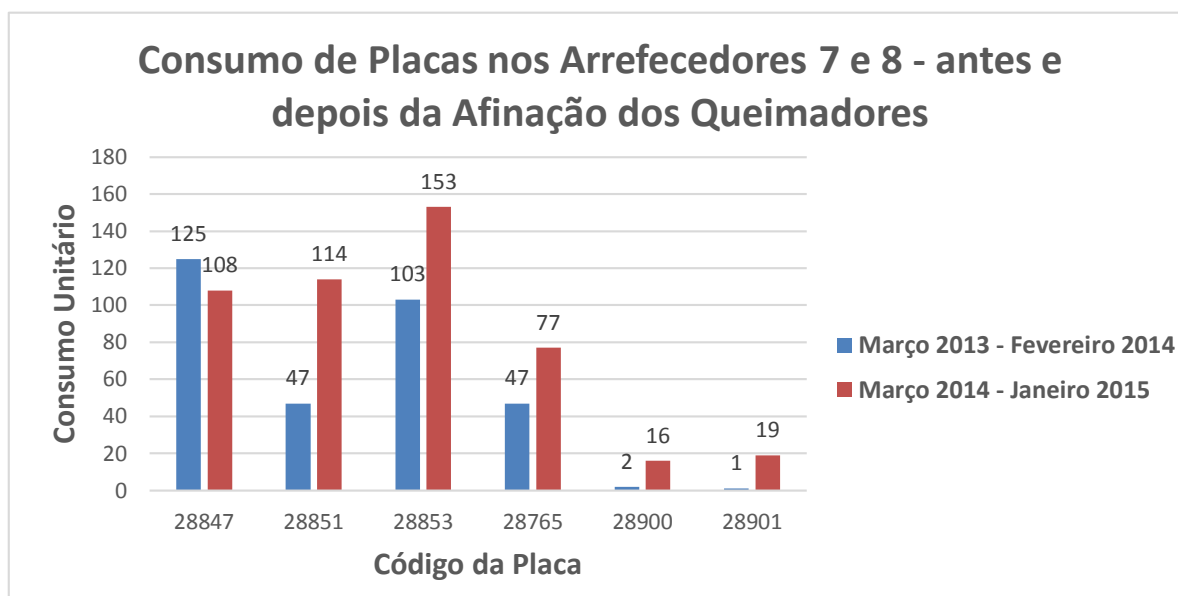


Figura 41 - Consumo de Placas nos Arrefecedores 7 e 8 antes e depois da Afição dos Queimadores

Observando agora a Figura 41 é claramente perceptível o aumento da maioria das placas utilizadas nas grelhas nos períodos de tempo contemplados, à exceção das placas centrais que se fazem representar neste gráfico pelo código 28847 e que sofreram uma ténue diminuição do seu consumo. Esta diminuição do consumo das placas centrais pode ser um pouco enganadora, uma vez que se o levantamento dos dados fosse feito um mês depois o consumo teria aumentado, ainda que muito ligeiramente.

Realizada a recolha de dados correspondentes ao número de placas substituídas nos intervalos de tempo considerados era então importante entender como é que este aumento era sustentado quando comparado à produção de clínquer durante os mesmos períodos de tempo. Esta confrontação pode ser observada na Figura 42.

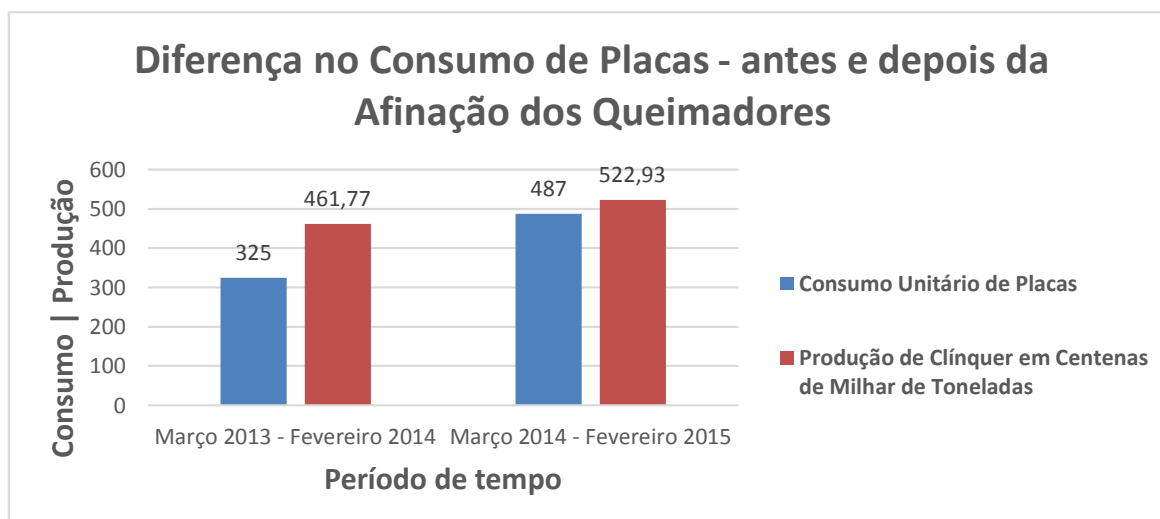


Figura 42 - Diferença no Consumo de Placas antes e depois da Afição dos Queimadores

É então possível afirmar agora que realmente a substituição de placas aumentou em maior escala comparativamente ao incremento que se fez notar na produção de clínquer. Com o intuito de possibilitar um melhor entendimento deste aumento, é apresentado na Figura 43 um gráfico que tem presente o cálculo do rácio entre a produção de clínquer e o número de placas substituídas nos intervalos de tempo considerados, onde é ainda mais evidente o aumento supracitado.

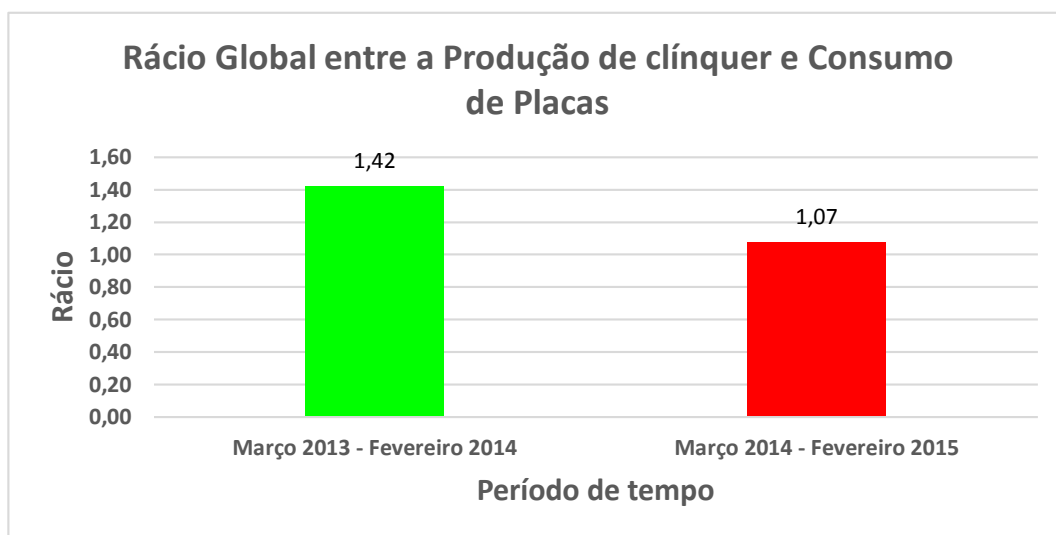


Figura 43 - Rácio Global entre a Produção de Clínquer e o Consumo de Placas

Feita esta análise, foi então altura de perceber a quantidade de placas de cada tipo que foi aplicada em cada um dos arrefecedores de clínquer a operar na fábrica Maceira-Liz e comparar essa informação com a quantidade de clínquer processada por cada arrefecedor, informação esta que está exposta no gráfico imediatamente a seguir.

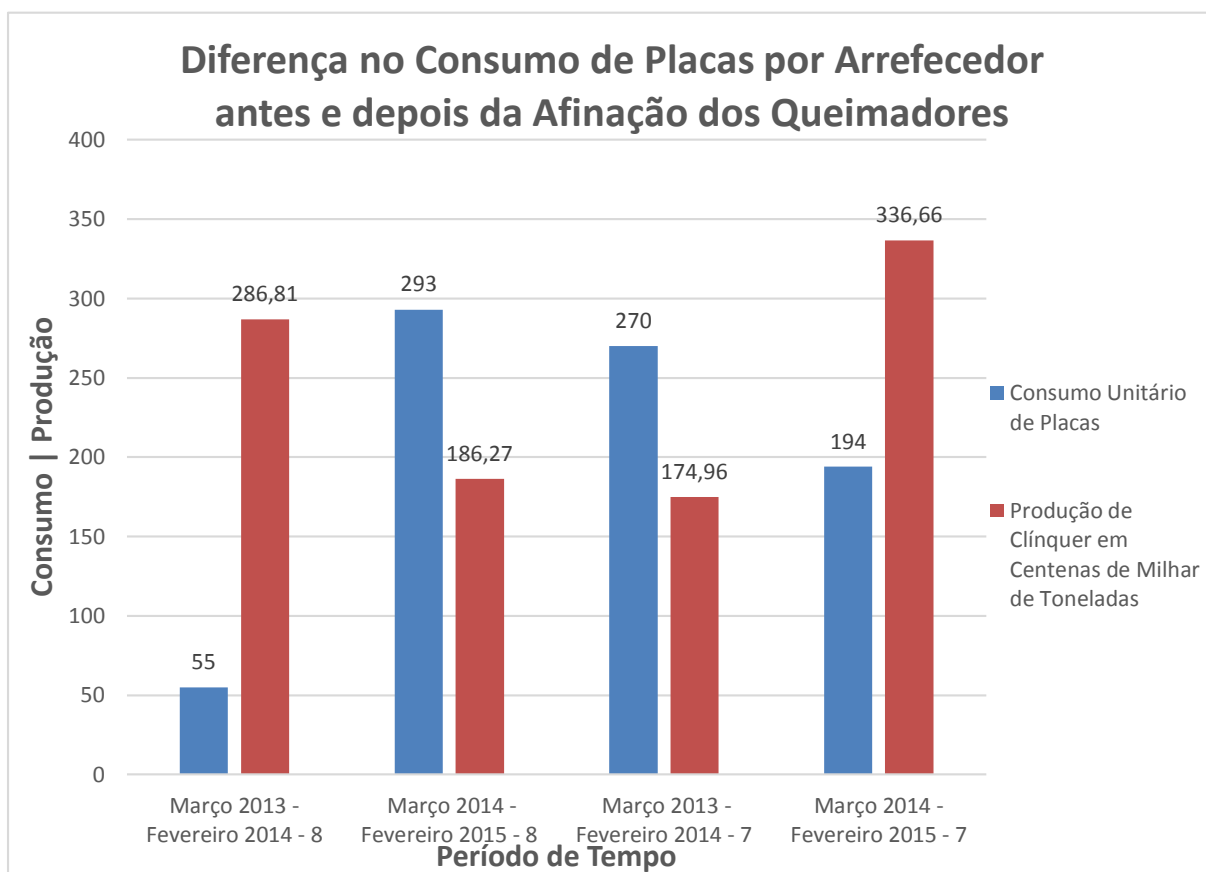


Figura 44 - Diferença no Consumo de Placas por Arrefecedor antes e depois da Afinação dos Queimadores

Examinando agora o gráfico da Figura 44 é então possível perceber que a situação do arrefecedor 8 teve um dramático aumento no consumo de placas apesar de ter processado uma menor quantidade de clínquer, pelo contrário, no arrefecedor 7 notou-se uma redução generosa no do lado da substituição das placas ao mesmo tempo que conseguiu processar quase o dobro do clínquer.

Esta comparação é agora feita de forma mais simples e de fácil perceção no gráfico que é representado imediatamente abaixo, onde estão representados os diferentes rácios entre a produção de clínquer e o consumo de placas para os dois arrefecedores nos períodos de tempo estabelecidos para esta análise.

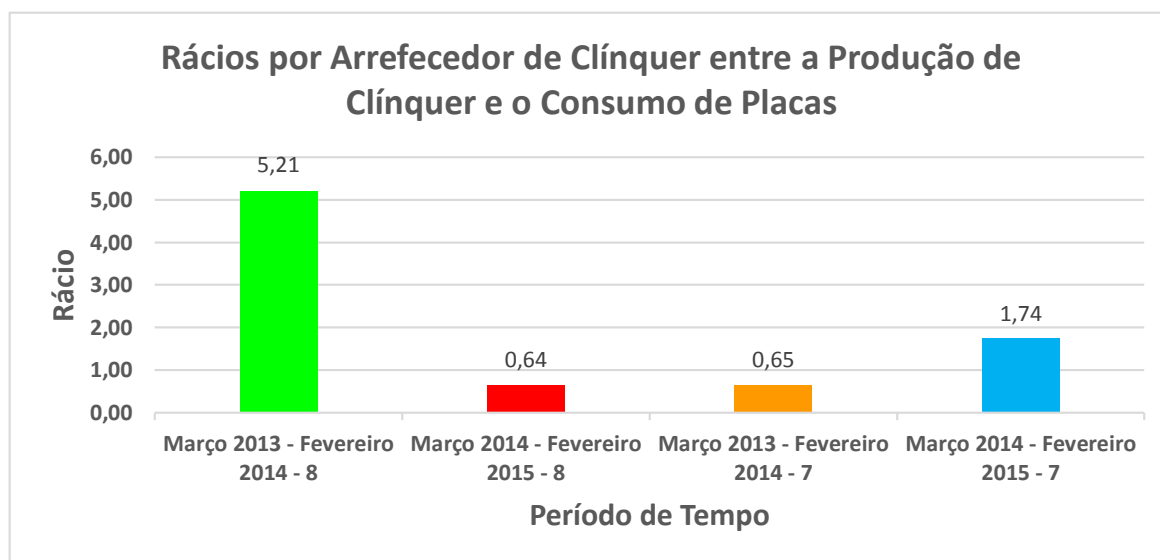


Figura 45 - Rácios por Arrefecedor de Clínquer entre a Produção de Clínquer e o Consumo de Placas

Considerando agora os últimos dois gráficos, das figuras 44 e 45, surgem algumas dúvidas se realmente a afinação dos queimadores representou um papel no aumento da substituição de placas, uma vez que só se no arrefecedor 8 é que se notou um consumo abrupto, enquanto no arrefecedor 7 até houve uma melhoria a esse nível.

Posto fim, não é possível determinar de uma forma incontestável se a afinação dos queimadores foi então a causa desta surpreendente subida no consumo de placas tendo afetado apenas o arrefecedor 8, sendo apenas certo, e ficando aqui patente, que para os períodos considerados a substituição global de placas aumentou depois das afinações dos queimadores.

Posto isto, e caso se tivesse verificado indubitavelmente que o problema tivesse advindo das afinações dos queimadores, é agora possível calcular o valor da diferença nos custos depois desse procedimento. Recorrendo ao preço médio de 135,25€ por placa e à diferença global de 162 placas é possível revelar o custo de manutenção dos arrefecedores de clínquer só em placas aumentou aproximadamente 22000€ entre os períodos de tempo definidos neste estudo.

O método aqui utilizado para a recolha de dados, recorrendo às saídas de armazém, apesar de nos indicar a quantidade não nos permite identificar os sítios específicos das grelhas dos arrefecedores onde as placas realmente são substituídas, impossibilitando assim a deteção de zonas que possam ser críticas. De maneira a que esta identificação fosse possível foi desenvolvida a ferramenta que é apresentada no ponto 6.2.2.3.

6.2.3. Controlo e Monitorização da Substituição de Placas nas Grelhas

Um dilema com que se deparavam alguns dos responsáveis pela manutenção da fábrica era a falta de informação aquando da substituição de placas num dos arrefecedores de clínquer. Esta falta de informação centrava-se na incerteza do sítio específico do arrefecedor onde teriam sido

substituídas as placas, isto é, era possível identificar as zonas onde as placas foram substituídas tendo em conta o seu tipo, mas era impossível identificar particularmente dentro dessa zona os sítios em que as placas tinham sido trocadas.

Da falta e a necessidade de uma ferramenta que o permitisse esta monitorização e controlo, foi criado um ficheiro Excel que consegue armazenar os dados relativos às substituições de placas de maneira a que estejam acessíveis. Assim, a qualquer altura, mediante a imputação das datas em que se pretende fazer a consulta são representadas num esquema baseado no *layout* das placas, ilustrado já previamente na figura 33, todas as placas que foram substituídas numa determinada intervenção, sendo também possível fazer a consulta do número de placas que foram substituídas no mesmo sítio num determinado intervalo de tempo.

No primeiro separador deste documento intitulado de “Instruções” estão presentes as instruções necessárias para a utilização do ficheiro, já no segundo separador designado por “Folha_inspecção_local”, está patente uma folha de inspeção pronta para impressão e que torna possível o registo local das placas substituídas, registo este que é realizado pelos preparadores da secção de Engenharia e Fiabilidade.

Na folha de inspeção local, presente no anexo XXII, a cada uma das 379 placas presentes no esquema corresponde um código, código esse que será introduzido no separador “Introduzir_dados”, ilustrado no anexo XXIII, acompanhado da data em que foi feita a intervenção, permitindo assim ao utilizador consultá-los mais tarde se necessário.

Realizada a introdução dos dados recolhidos no local, é então possível fazer a consulta das placas que foram substituídas numa determinada intervenção através da introdução da data da sua realização na célula indicada para esse efeito presente no separador “Consulta_gasto_placas”. O resultado dessa consulta é então apresentado num esquema em que estão reproduzidas as duas grelhas do arrefecedor e que é exibido no anexo XXIV, onde cada placa que foi substituída aparece com a cor representativa de um determinado tipo de placa e com a letra que lhe é associada, sendo possível fazer a associação da letra ao código interno das várias placas recorrendo a uma tabela presente no mesmo separador.

Por outro lado, é também possível consultar o número de vezes que uma placa foi substituída num determinado sítio no separador “Consulta_gasto_tempo” ilustrado na imagem seguinte e no anexo XXV, onde se encontra mais perceptível. Estabelecendo um intervalo de tempo que pode ser definido nas células indicadas para tal, é representado num esquema semelhante ao presente no separador “Consulta_gasto_placas” o número de vezes que uma determinada placa foi substituída e o sítio correspondente, que fica colorido com a cor associada a um determinado tipo de placa.

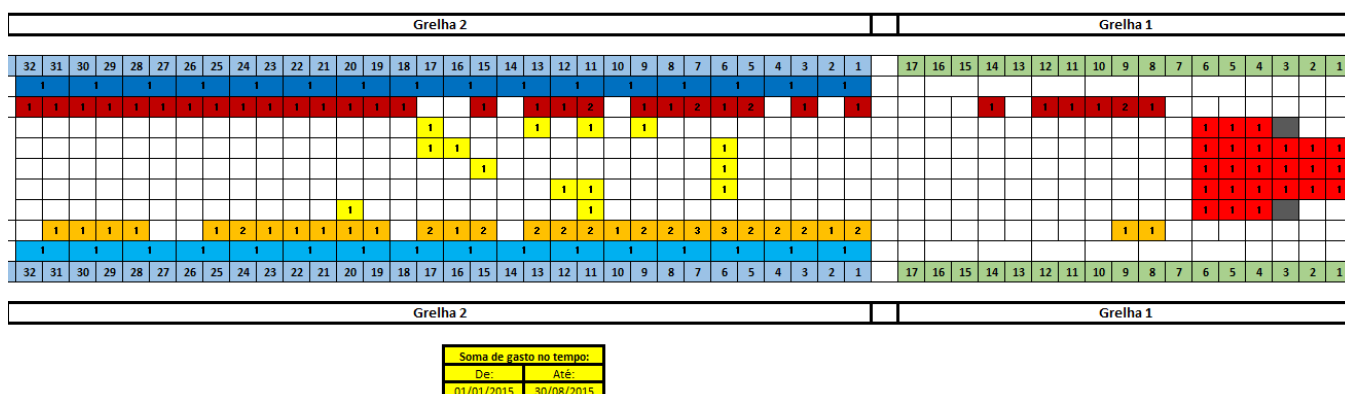


Figura 46 – Separador “Consulta_gasto_tempo” do ficheiro Excel desenvolvido.

Na Figura 46 podemos então observar o número de vezes que foram substituídas placas num determinado local durante o período de 1 de Janeiro de 2015 e 8 de Agosto de 2015 para o arrefecedor de clínquer 8 da linha de produção 5.

Em todos os esquemas representativos das grelhas dos arrefecedores o fluxo de material ocorre da direita para a esquerda, ou seja, da primeira para a segunda grelha e saindo eventualmente do arrefecedor.

Apesar da base de dados ainda reduzida, o que não permite uma análise mais cuidada do problema, é já possível através desta simples ferramenta identificar alguns locais em que é notória a maior necessidade de substituição de placas, quer para o arrefecedor 8 representado acima e no anexo XXV, quer para o arrefecedor 7, cujo esquema referente ao separador “Consulta_gasto_tempo” se ilustra no anexo XXVI.

6.2.4. Otimização das Placas

Com a ajuda da ferramenta desenvolvida e apresentada no ponto prévio, foi então possível determinar que existem três tipos de placas que são alvo de uma substituição mais regular. Esses três tipos são as placas centrais com sulcos, as laterais esquerdas e as laterais direitas.

Aliando agora toda informação reunida quer no levantamento feito no estudo da possível influência da afinação dos queimadores no aumento da substituição de placas, quer no registo local de placas acompanhado e armazenado no ficheiro Excel desenvolvido, ao *feedback* por parte do responsável e dos colaboradores da secção de Engenharia e Fiabilidade foi possível isolar a placa lateral esquerda como o tipo de placa que é realmente mais suscetível a falhar.

Foi então a placa lateral esquerda que foi sujeita a algumas mudanças com vista à melhoria do seu desempenho, não só a nível do seu tempo em serviço mas também a nível da sua capacidade para arrefecer o clínquer.

Para que fosse possível executar as alterações pretendidas, a sua análise e a sua inevitável comparação com a placa em utilização recorreu-se ao *software* SOLIDWORKS, utilizando-o como ferramenta para os desenhos 3D e para os ensaios que aqui serão apresentados.

O primeiro passo tomado foi então a transposição do desenho em 2D da placa lateral esquerda disponível na fábrica para uma modelação em 3D, ilustrada na Figura 47, que poderia então ser alvo de ensaios que permitissem no final estabelecer uma comparação com a solução desenvolvida.

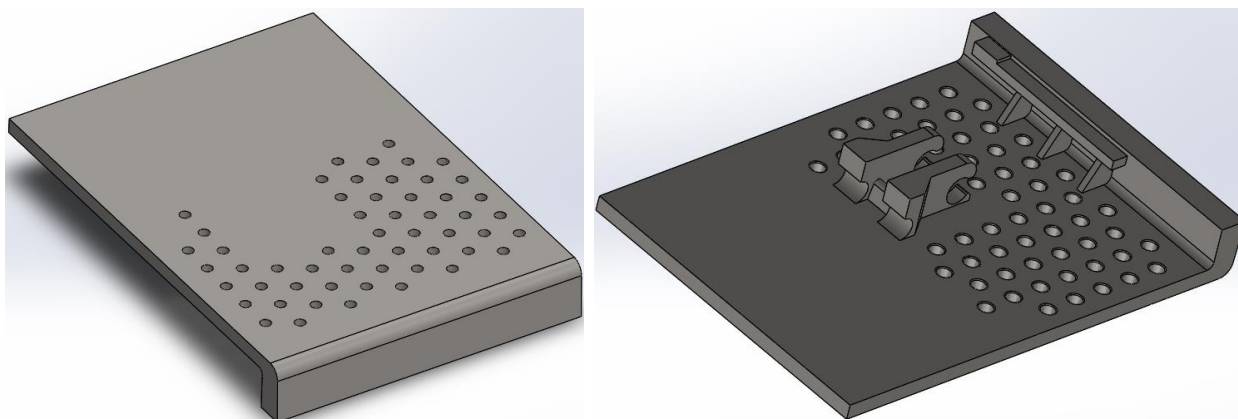


Figura 47 - Modelo da Placa Lateral Esquerda Desenhado em SOLIDWORKS

Concluído o desenho, era então altura de definir o material utilizado nas placas, o que se revelou uma dificuldade dada a sua não existência na biblioteca de materiais do SOLIDWORKS o material utilizado nesta placa, houve então necessidade de criar esse material. Para que fosse possível a execução dos ensaios aqui apresentados, as características definidas para o material são então resultado da consulta de [23], dos documentos [1] e [6] e ainda de uma solução de compromisso consequência da carência de algumas características do material como o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a tensão de corte. Estas características em falta foram então adaptadas do aço inoxidável 1.4439 X2 CrNiMoN 17-13-5 presente na biblioteca do SOLIDWORKS na secção dos DIN Materials, sendo este de entre todos os presentes o que apresentava as características mecânicas mais aproximadas às do material utilizado nas placas ensaiadas.

Apesar de algumas dificuldades, o material utilizado nas placas para os ensaios efetuados ficou então definido, tendo por base uma solução de compromisso, com as características que podem ser observadas no quadro representado na Figura 48.

Properties Tables & Curves Appearance CrossHatch Custom Application Data F1

Material properties
Materials in the default library can not be edited. You must first copy the material to a custom library to edit it.

Model Type: Linear Elastic Isotropic

Units: SI - N/mm² (MPa)

Category: Aços_fund

Name: 1.4823 (GX 40 CrNiSi 27-4)

Default failure criterion: Max von Mises Stress

Description: -

Source:

Sustainability: 1.4439 (X2CrNiMoN17-13-5) in SolidWor Select...

Property	Value	Units
Elastic Modulus in X	200000	N/mm ²
Poisson's Ration in XY	0.28	N/A
Shear Modulus in XY	79000	N/mm ²
Mass Density	7600	kg/m ³
Tensile Strength in X	680	N/mm ²
Compressive Strength in X		N/mm ²
Yield Strength	250	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient in X	1.66e-005	/K
Thermal Conductivity in X	39.6	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Figura 48 - Parâmetros Definidos no SOLIDWORKS para o Material Utilizado nas Placas

6.2.4.1 Estudo da Placa Lateral Esquerda Utilizada

Para que este ensaio fosse possível houve necessidade de fazer uma montagem da placa a ser testada com um pino que simula o parafuso utilizado para fixar a placa no seu devido local, montagem essa que é representada na Figura 49.

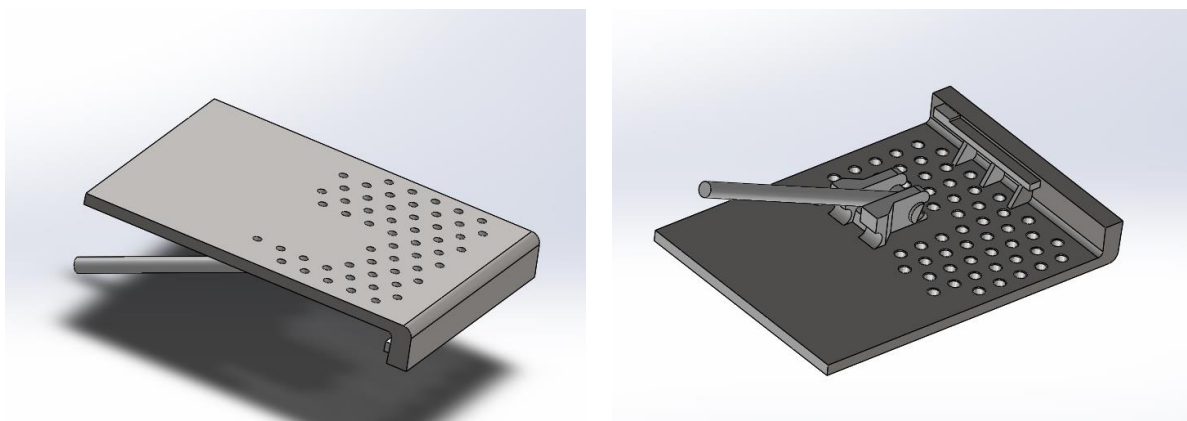


Figura 49 – Montagem do Modelo Desenhado da Placa com o Pino de Fixação

Posto isto, foi necessário definir os esforços e as restrições que seriam aplicados à placa por forma a replicar a situação de serviço a que está sujeita.

Em primeira instância, sabendo as suas dimensões da placa, a altura da camada considerada e a densidade do clínquer, foi calculada a força que exercida pela camada de clínquer sobre a placa.

$$Força = Largura_{Placa} \times Comprimento_{Placa} \times Altura_{Camada} \times Densidade_{Clínquer} \times 10$$

(13)

Onde:

- Força é a força aplicada na placa pela camada de clínquer em N.
- $Largura_{Placa}$ é a largura da placa em m.
- $Comprimento_{Placa}$ é o comprimento da placa em m.
- $Altura_{Camada}$ é a altura da camada de clínquer em m.
- $Densidade_{Clínquer}$ é a densidade do clínquer em kg/m^3 .

Assim, é possível calcular a força exercida na placa pela camada de clínquer através da equação 13 sabendo que:

- A largura da placa é de 0,3 m;
- O comprimento da placa é de 0,4 m;
- A altura da camada é de 0,5 m;
- A densidade do clínquer é 1500 kg/m^3 [3] e [20].

$$Força = 0,3 \times 0,4 \times 0,5 \times 1500 \times 10 = 900 \text{ N}$$

De seguida, foram definidas os apoios e fixações da placa tendo em conta a montagem que se verifica no local e que é ilustrada na Figura 50.

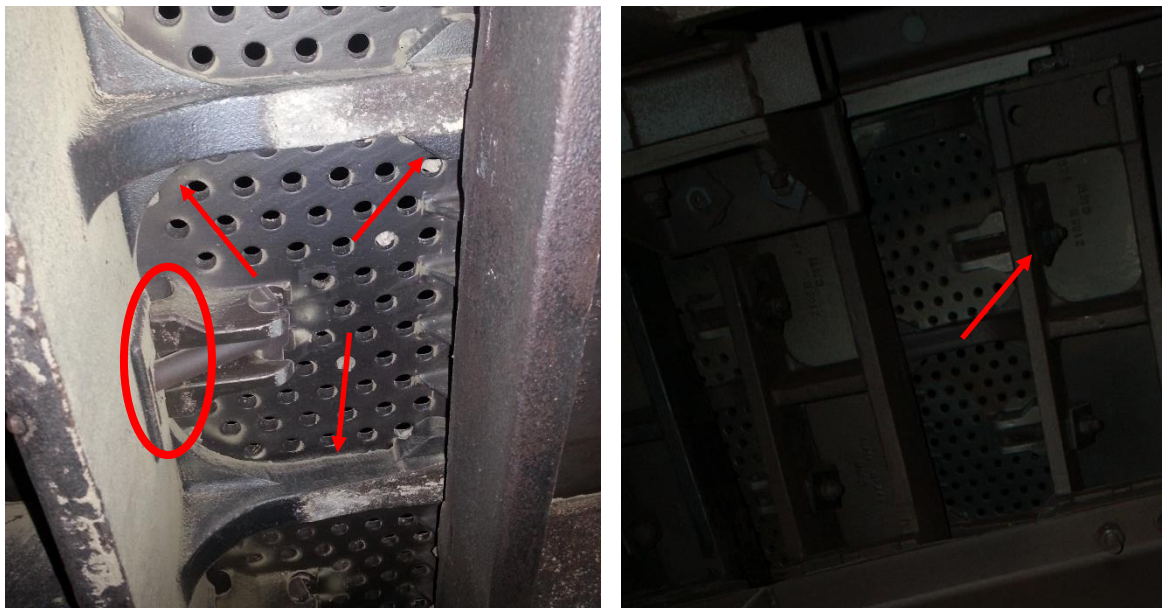


Figura 50 - Apoios e Fixações da Placa

Nas imagens apresentadas abaixo é então possível observar a maneira como foi efetuada a aplicação das cargas e das fixações no modelo desenhado para os ensaios.

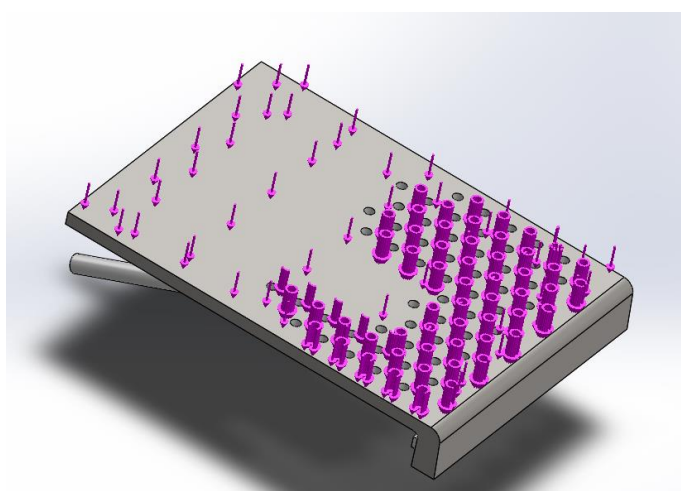


Figura 51 - Aplicação da Força de 900 N na Placa

É então possível ver na imagem da figura 51 a representação da força de 900 N aplicada na placa, que representa a força exercida pela camada de clínquer.

Já na Figura 52 é possível testemunhar as fixações utilizadas com o intuito de replicar as fixações reais da placa, onde a fixação assinalada com o número 1 corresponde ao apoio da placa no seu suporte no eixo das ordenadas, a fixação indicada com o número 2 representa o apoio da placa no eixo das abcissas no suporte e a fixação sinalizada com o número 3 representa a fixação do parafuso que mantêm a placa no seu lugar ao suporte. As fixações 1 e 3 representam apoios simples enquanto a fixação do pino representa um encastramento, sendo que este não tem movimento de rotação nem translação.

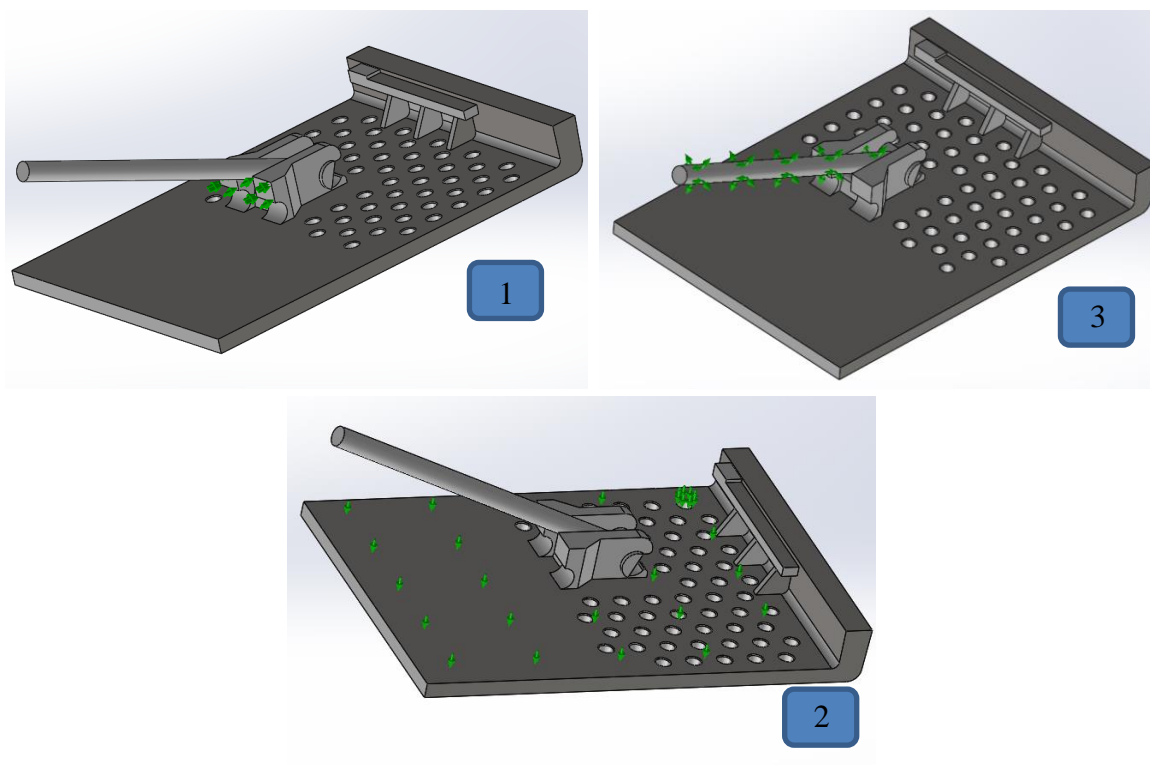


Figura 52 – Aplicação dos Apoios e Fixações da Placa Estabelecidos

Por fim, ao nível das solicitações exercidas na placa, estava apenas em falta a replicação do efeito da temperatura sofrido pela placa. Como a temperatura das placas não é monitorizada, foi considerada uma temperatura de 300 °C para a parte superior da placa em contacto com o clínquer que está a ser arrefecido, e uma temperatura de 200 °C para a parte inferior da placa em contacto com o ar de arrefecimento, tentando reproduzir a situação mais desfavorável sofrida pela placa, estando o arrefecedor de clínquer a trabalhar com o seu processo normalizado. As aplicações destas solicitações podem ser então observadas Figura 53.

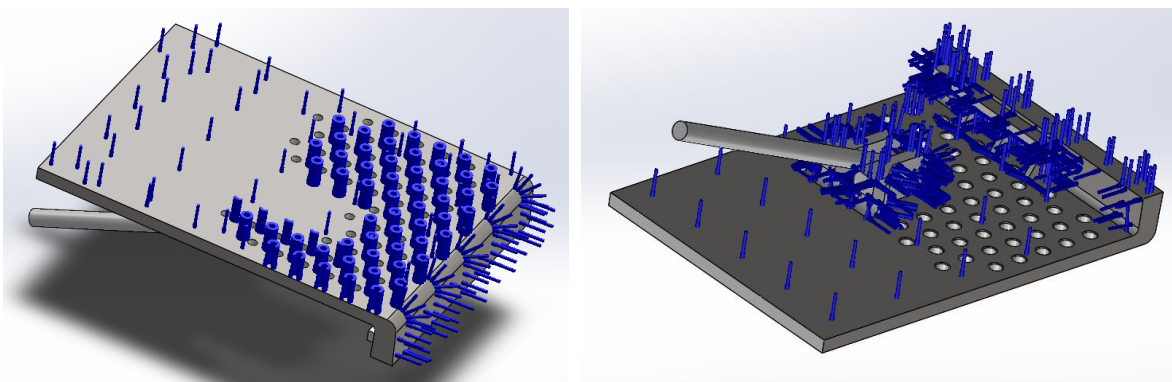


Figura 53 - Aplicação das Cargas Térmicas na Placa

Olhando para a Figura 53, podemos observar na imagem da esquerda a aplicação da temperatura de 300 °C nas zonas da placa em contacto com o clínquer, já na imagem da direita é possível

visualizar o emprego da temperatura de 200 °C nas zonas em contacto com o ar de arrefecimento.

Para que este ensaio estático decorresse sem problemas, foi então necessário estabelecer o contacto entre o pino de fixação que representa o parafuso e a placa. Para tal, foi determinado que as peças estariam em contacto mas que não se poderiam atravessar uma à outra.

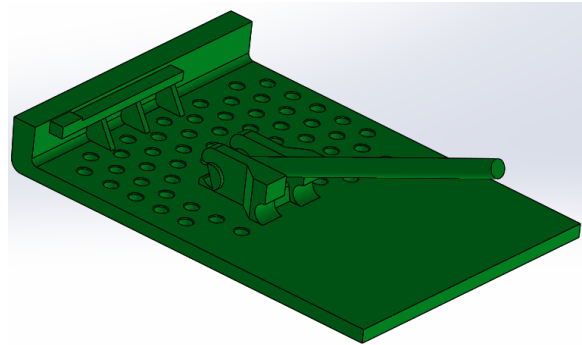
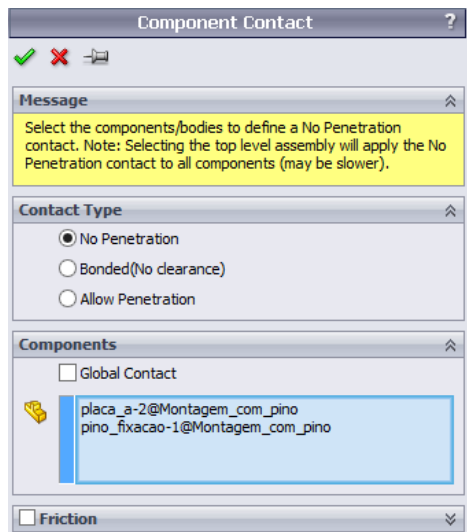


Figura 54 - Estabelecimento de Contacto entre as Peças

Assim, e para que se conseguisse realizar o ensaio estático com base no cálculo por elementos finitos realizado pelo *software*, foi aplicada uma malha ao conjunto de peças a ensaiar. A malha resultante aqui utilizada e as suas características podem ser vistas nas Figuras 55 e 56.

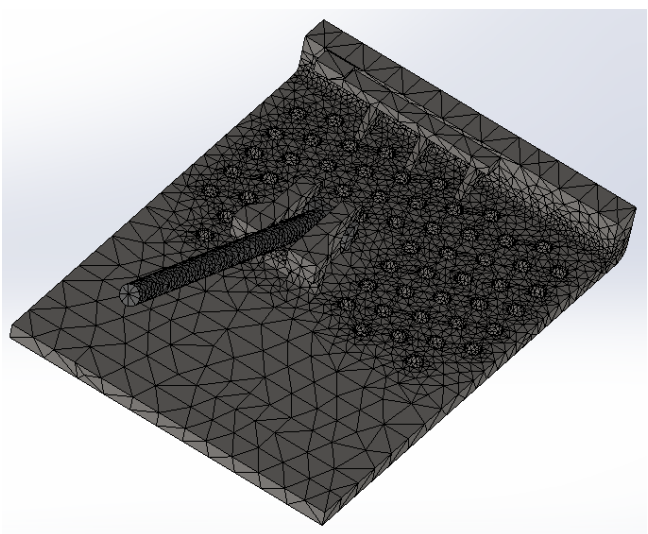
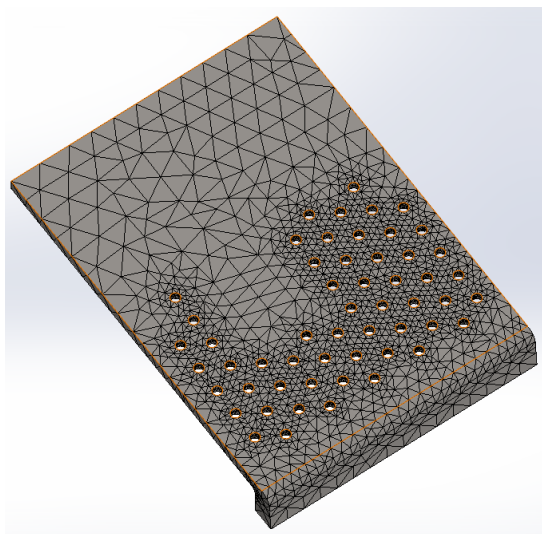


Figura 55 - Malha Utilizada no Ensaio

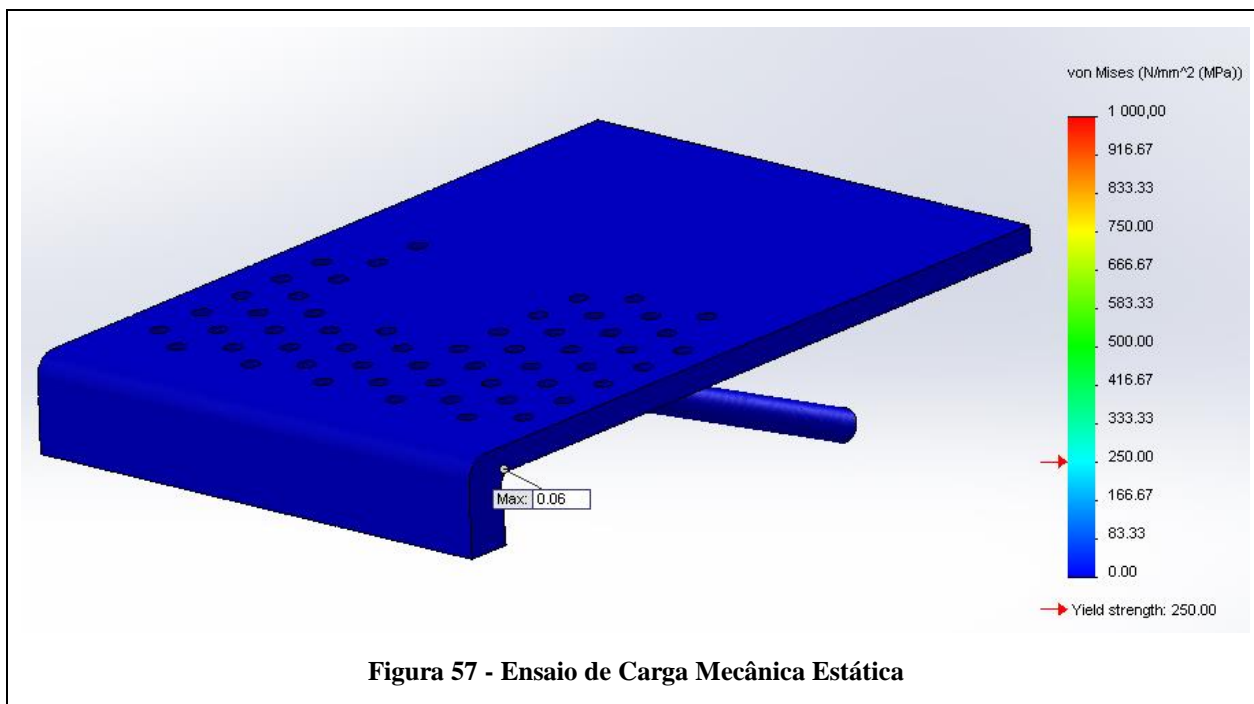
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	25 mm
Min Element Size	5 mm
Mesh quality	High
Total nodes	67413
Total elements	39830
Maximum Aspect Ratio	22.053
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	93
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.0151
% of distorted elements (Jacobian)	0

Figura 56 - Propriedades da Malha Utilizada no Ensaio

Para esta malha, e dada a capacidade de adaptação dos seus elementos às zonas de menores dimensões, foi escolhido o tamanho máximo de 25 mm dos seus elementos por forma a garantir uma simulação menos pesada, tendo em conta a capacidade das ferramentas que foram utilizadas.

Finalmente, definidos todos os parâmetros necessários e era então possível dar início aos ensaios estáticos e à consequente observação dos resultados obtidos. Há ainda necessidade de realçar que na escala do gráfico das tensões, e por falta de acesso à tensão de rutura do material utilizado nas placas, foi estabelecido como teto o valor máximo encontrado de resistência à tração deste material (valor esse que não foi o utilizado como valor de resistência à tração no ensaio), pelo que todos os valores iguais ou acima do valor máximo estabelecido de 1000 MPa representarão uma falha do material, e portanto, da peça.

Numa primeira fase, foi realizado um ensaio apenas com a força que representa a camada de clínquer que se situa por cima da placa, tendo-se obtido o resultado que se ilustra na Figura 57.



Analisando a figura imediatamente acima, podemos então concluir que a placa suporta perfeitamente a carga representativa do peso da camada de clínquer, estando o valor máximo de tensão calculado, de 0,06 MPa, bem abaixo dos limites do material, pelo que decerto não será este o parâmetro que desempenha um papel de relevo na situação em análise, a falha das placas.

Deste modo, foram então aplicadas as cargas térmicas que têm como objetivo replicar o efeito da temperatura sofrido pela placa em conjunto com a força que representa o peso da camada de clínquer exercido sobre a placa. Como se pode reparar nas imagens da Figura 58, o efeito destas cargas térmicas é então bastante significativo.

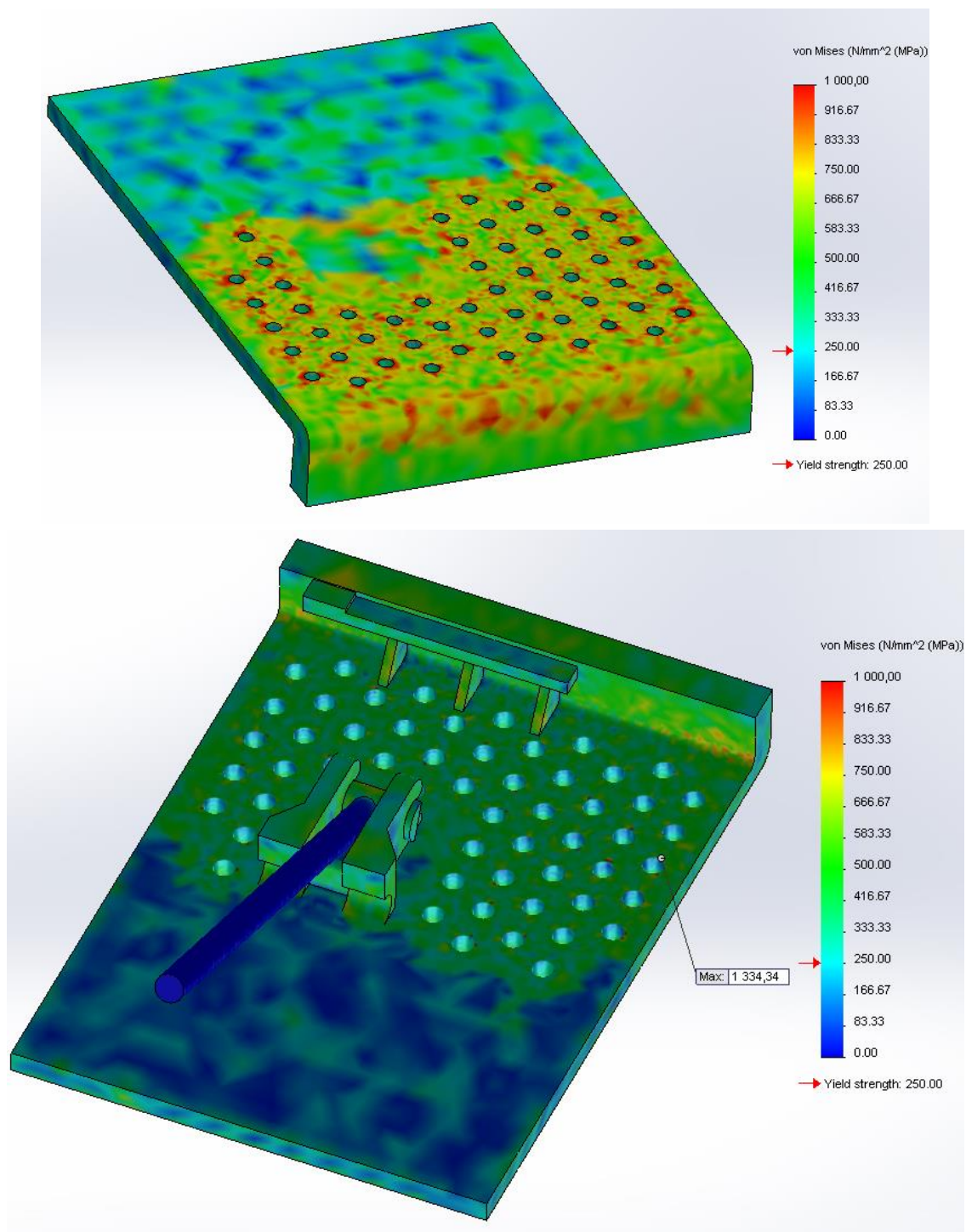


Figura 58 - Resultados do Ensaio Estático com a Aplicação de todas as Cargas

Atentando agora às imagens da Figura 58, é possível reparar que existem algumas zonas a vermelho bem pronunciadas na transição do topo para zona frontal da placa e principalmente ao redor dos furos no topo da placa, no entanto, é na zona inferior da placa que aparece o valor máximo de tensão na placa, apresentando o valor de 1334,34 MPa.

É certo que o ensaio realizado é estático e na realidade as placas têm movimento, e ainda que, apesar da tentativa de replicar o efeito do contacto do ar de arrefecimento com a zona inferior

da placa impondo-lhe uma solicitação diferente da aplicada ao topo da placa, não se consegue reproduzir a 100% esse efeito, podendo algumas das cargas que ultrapassam a escala aqui definida advir destas situações.

Independentemente da replicação do efeito descrito acima a 100% ou não, o que é certo, é que ao compararmos os resultados obtidos neste ensaio com as fraturas das placas que se sucedem na realidade, as semelhanças são notórias.

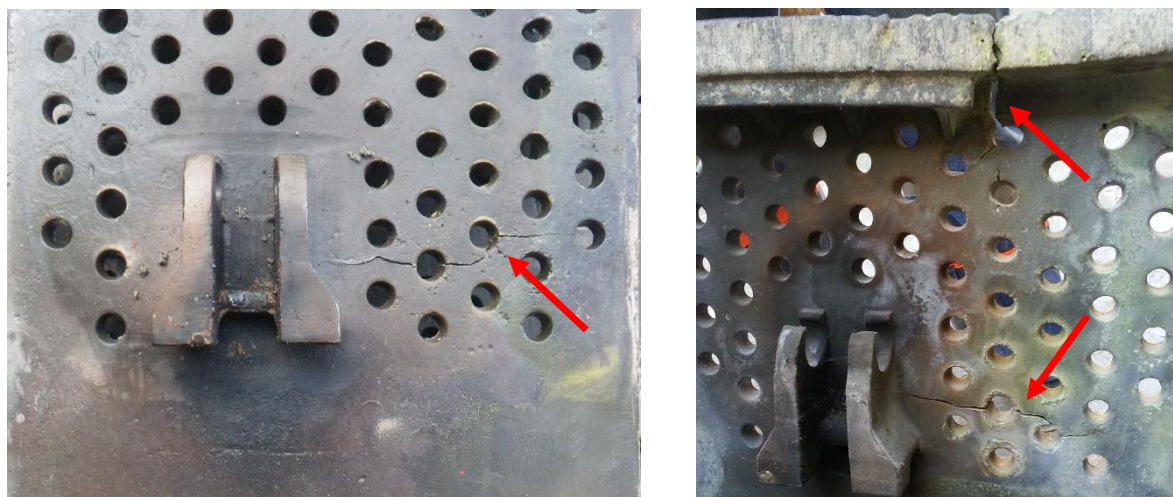


Figura 59 - Zonas de Fratura de algumas Placas

Olhando agora para as imagens ilustradas na Figura 59, e fazendo a comparação com os resultados apresentados na figura 58, é possível concluir que o ensaio realizado se aproxima bastante da realidade, sendo identificadas as zonas mais propícias à ocorrência de uma falha por parte da placa.

Assim, este ensaio e todos os exemplos reais presenciados pelo aluno foram tomados como ponto de partida para uma otimização da placa utilizada atualmente.

6.2.4.2 Estudo da Placa Lateral Esquerda Otimizada

Com o intuito de melhorar o desempenho deste tipo de placas, foram efetuadas algumas alterações à geometria da mesma com base nas situações de falha que ocorreram.

Após a execução de alguns desenhos e da discussão das várias opções para o desenho da placa lateral esquerda a propor, tentando ao máximo não alterar de uma forma muito profunda o desenho em vigor, a geometria proposta para a placa lateral esquerda acordada entre o aluno e o responsável pela departamento de Engenharia e Fiabilidade para os ensaios finais é a que se apresenta nas imagens ilustradas imediatamente abaixo, sendo de seguida explicadas as razões de cada alteração.

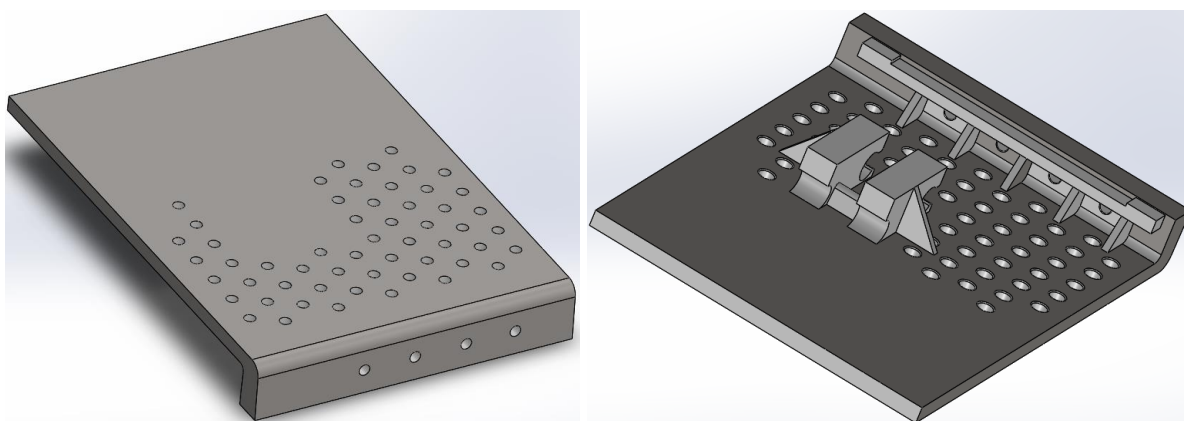


Figura 60 - Modelo da Placa Proposta para Substituição Desenhado em SOLIDWORKS

Assim, a primeira alteração, e por forma a evitar situações semelhantes à da imagem direita da Figura 59, foram realizados quatro furos na parte frontal da peça com a intenção de arrefecer essa zona, tornando-a menos sensível à carga térmica que o clínquer lhe impõe. Estando desta forma a enfraquecer mecanicamente esta zona ao retirar-lhe material e introduzir-lhe zonas de concentração de tensões, foram também prolongados os reforços da zona frontal como forma de anular o efeito dos furos adicionados.

Deste modo, podem ser identificadas estas mudanças nas imagens da Figura 61 seguinte comparando a zona frontal do lado interior da placa lateral esquerda utilizada indicada com o número 1 e a que aqui é proposta identificada com o número 2.

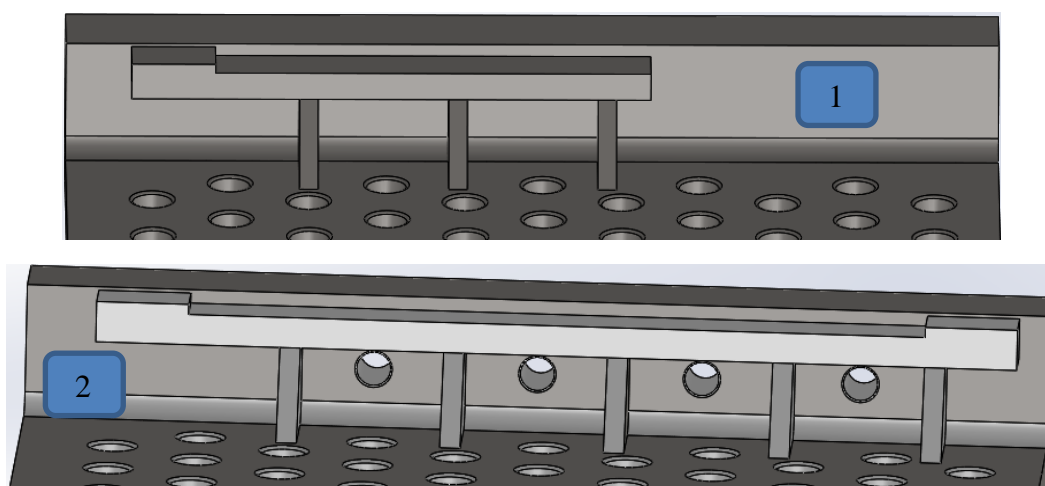


Figura 61 - Alterações Realizadas na Zona Frontal Interior da Placa

A modificação que se segue foi realizada com vista à atenuação ou até mesmo eliminação dos resultados reais que se encontram identificados nas imagens da figura seguidamente exposta.



Figura 62 - Exemplos de Fraturas Junto ao Apoio de Fixação da Placa

Na tentativa de minimizar este efeito, foram então removidas as zonas de concentração de tensões indicadas Figura 62 e aumentada a área de secção da peça nessas zonas. O resultado pode então ser observado na figura seguinte, podendo-se comparar a placa lateral esquerda em uso identificada com o número 1 e a alteração realizada indicada com o número 2.

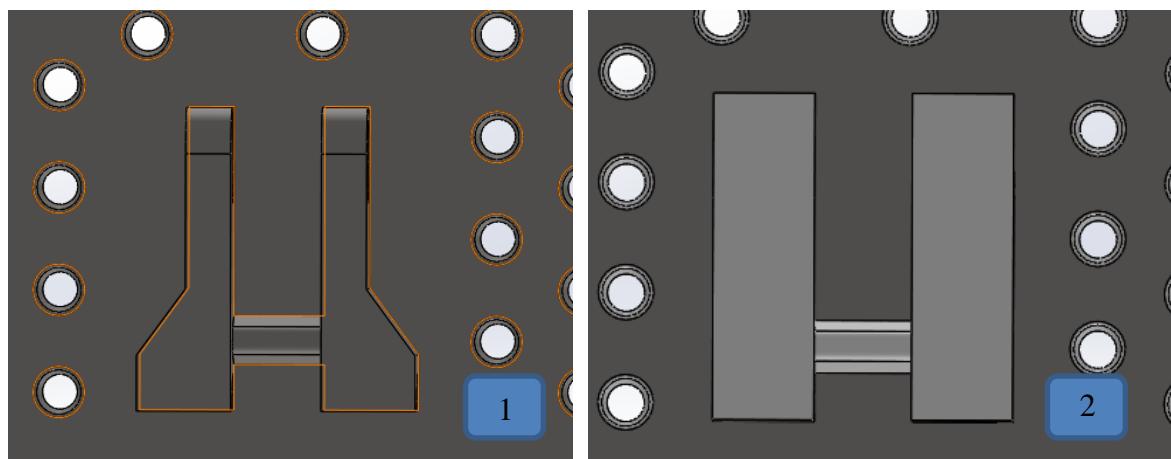


Figura 63 - Comparação entre os Apoios de Fixação da Placa Utilizada e da Proposta

Ainda com o propósito de evitar situações como as que são representadas na Figura 64, foram ainda acrescentadas ao apoio duas nervuras.

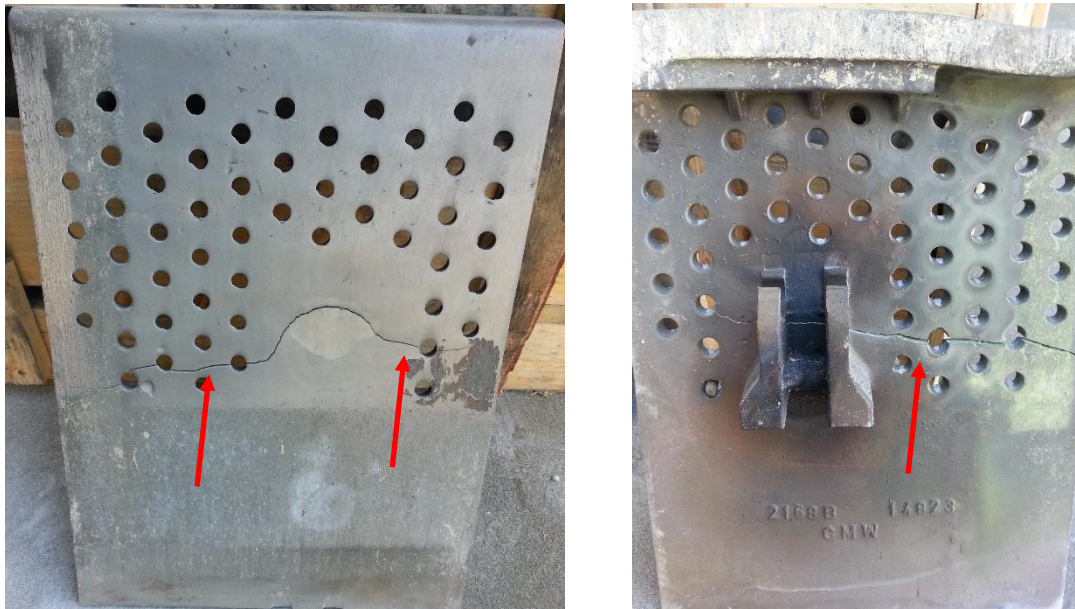


Figura 64 - Placas Fraturadas Substituídas

As nervuras acrescentadas, que podem ser identificadas na Figura 65, têm então como função proporcionar dar um suporte adicional à placa e também desviar algumas tensões sofridas por esta para si, nomeadamente nas zonas dos furos onde é usual a placa fraturar, como é exemplificado na Figura 64.

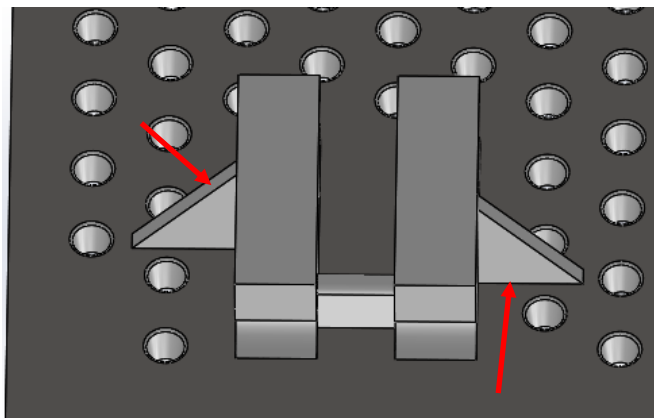


Figura 65 - Apoio de Fixação da Placa Proposta Completo

Apresentadas todas as alterações feitas à geometria da placa lateral esquerda em vigor, tal como ocorreu no ensaio da placa lateral esquerda sem estas alterações, também aqui houve necessidade de recorrer a uma montagem da placa com um pino que simula o parafuso que fixa a placa no seu devido local.

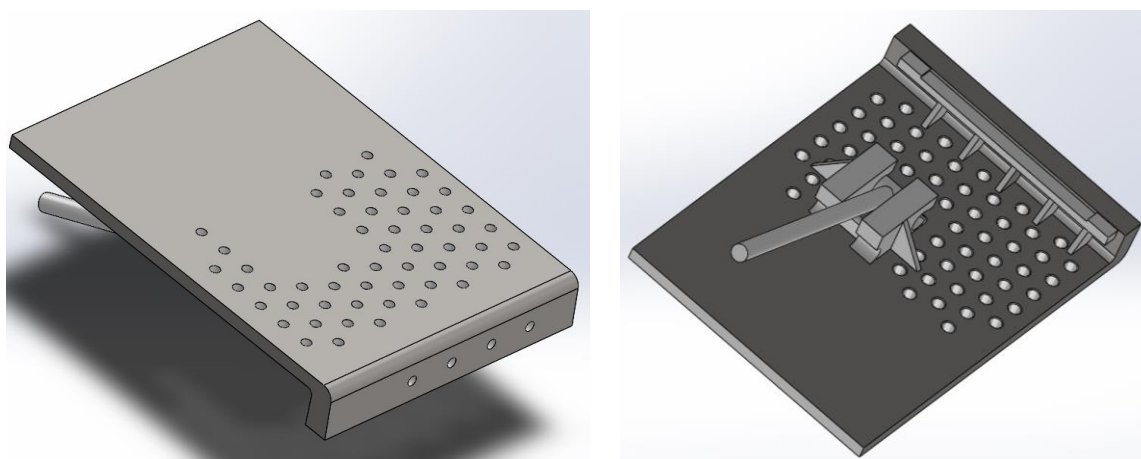


Figura 66 - Montagem da Placa Proposta com o Pino de Fixação

Tomada a decisão de estudar a placa ilustrada na Figura 60, foram então realizados para esta montagem os mesmos processos concretizados para o ensaio da placa lateral esquerda em utilização, aplicando exatamente as mesmas cargas e fixações para que no final seja possível estabelecer uma comparação entre ambas e retirar algumas conclusões desse confronto de resultados.

Nas imagens da Figura 67 e 68 é então possível observar a aplicação das fixações e cargas a esta montagem.

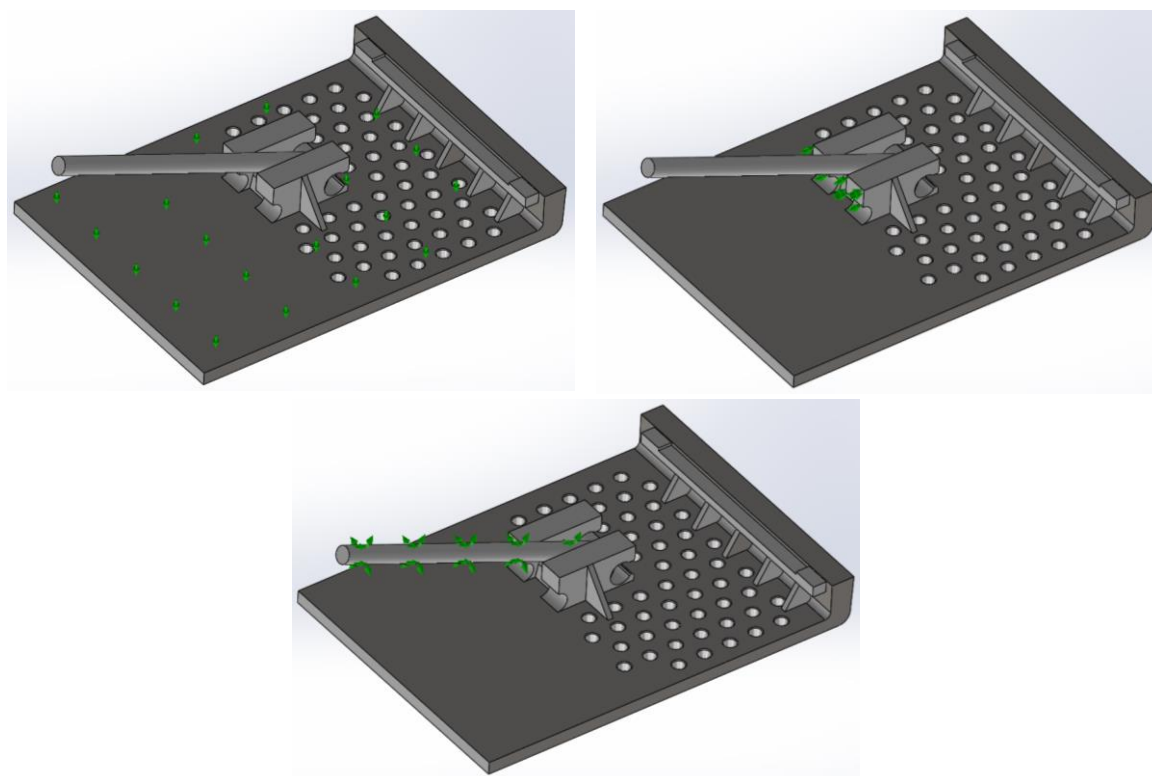


Figura 67 - Fixações Aplicadas à Montagem da Placa Proposta

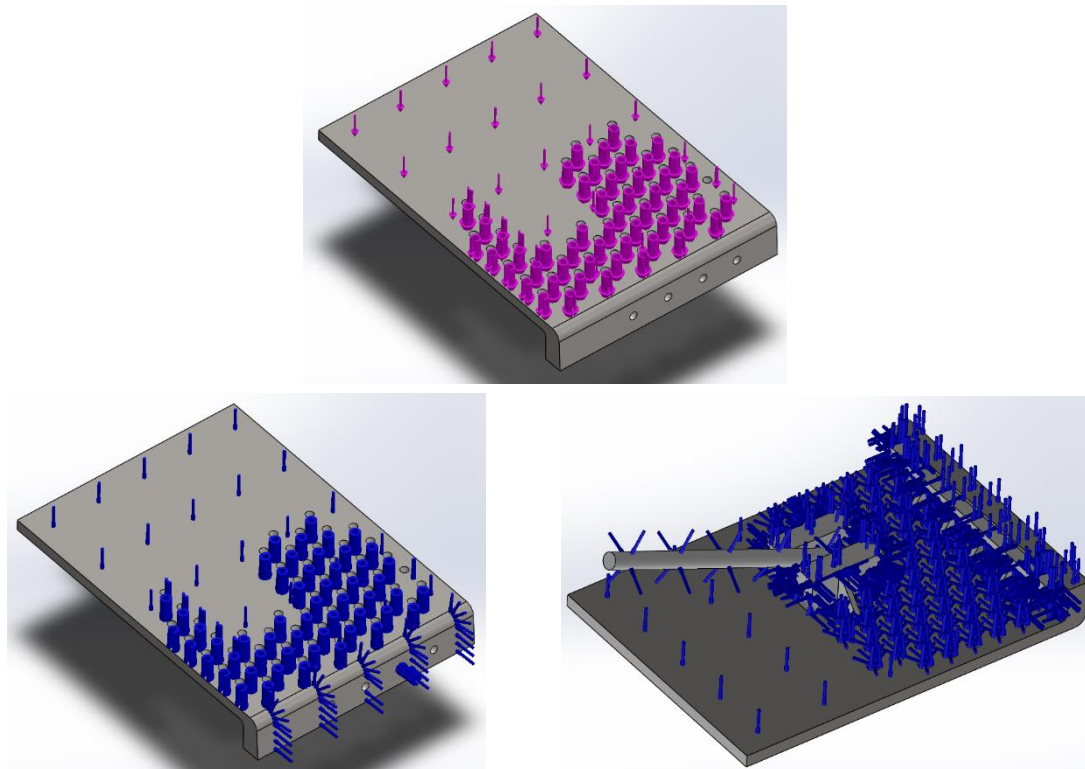


Figura 68 - Cargas Aplicadas à Montagem da Placa Proposta

Seguidamente, e para que o ensaio corresse sem dificuldades, foi então estabelecido o contacto entre as duas peças da montagem, ficando definido que não se poderiam atravessar uma à outra.

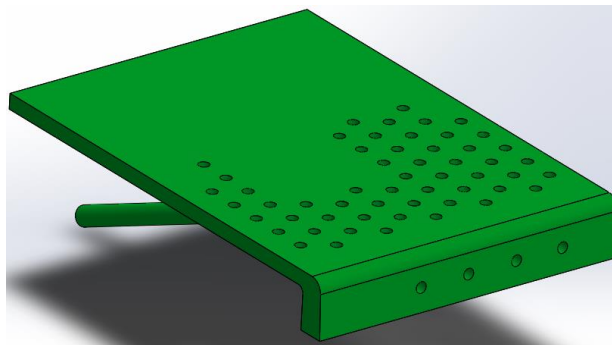
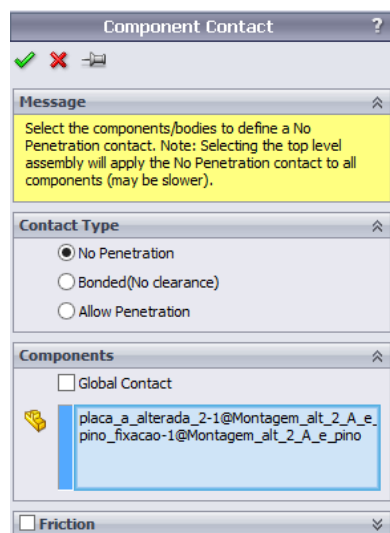
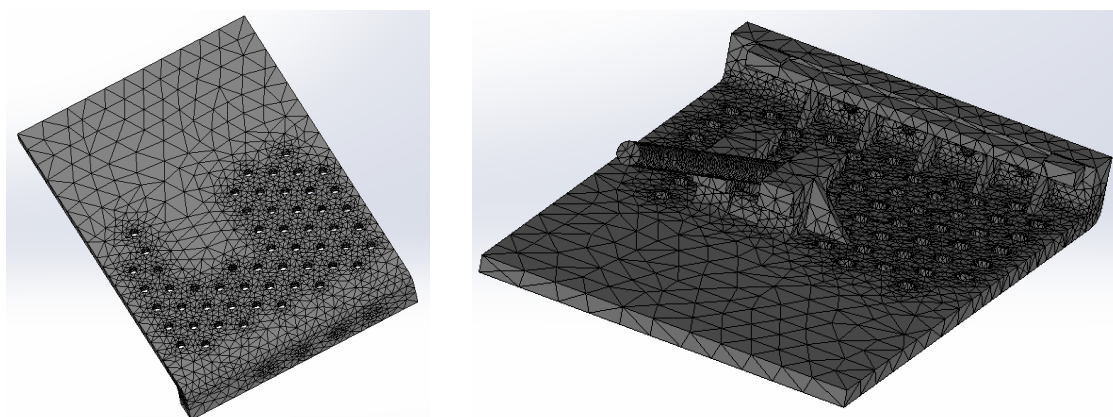


Figura 69 - Estabelecimento do Contacto entre as duas Peças da Montagem

Posto isto, faltava só aplicar a malha ao conjunto para se poder efetuar o estudo estático deste conjunto. A malha utilizada, bem como as suas características podem ser observadas nas Figura 70.



Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	25 mm
Min Element Size	5 mm
Mesh quality	High
Total nodes	73547
Total elements	43567
Maximum Aspect Ratio	24.796
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	92
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.0849
% of distorted elements (Jacobian)	0

Figura 70 - Malha Utilizada no Ensaio da Montagem da Placa Proposta e as suas Características

Também para o ensaio desta montagem o tamanho máximo escolhido para os elementos da malha foram os 25 mm utilizados no ensaio da placa sem alterações. As razões que levaram a esta escolha foram as mesmas previamente apresentadas aquando da exposição da malha realizada na placa lateral esquerda utilizada de momento, e ainda a própria utilização dessa malha no ensaio feito a essa placa, mantendo assim os mesmos parâmetros para ambos os ensaios.

No que toca à escala do gráfico das tensões, foi mantida a mesma do ensaio anterior, visto que o material utilizado é o mesmo, não havendo assim necessidade de proceder a qualquer alteração neste tópico.

Finalmente, e seguindo o mesmo procedimento da análise à montagem anterior, foi realizado um ensaio apenas com a força que representa a camada de clínquer que se situa por cima da placa, tendo-se obtido o resultado que se apresenta de seguida.

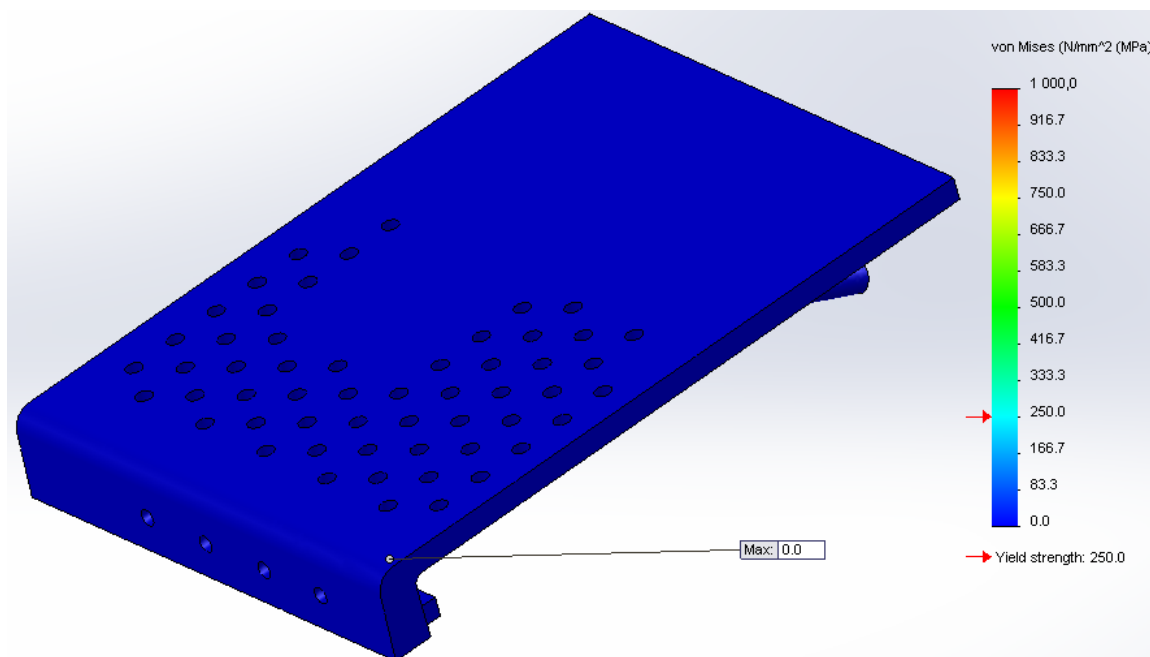


Figura 71 - Resultado do Ensaio Estático Realizado à Montagem da Placa Proposta só com a Força de 900 N Aplicada

Como se pode observar na Figura 71, a força 900 N que representa a carga que a camada de clínquer exerce sobre esta placa é nula, não representando por si só qualquer ameaça à integridade estrutural da placa. Certamente, também nesta placa serão as cargas térmicas que desempenharão o papel de maior relevo.

Assim sendo, foram aplicadas as cargas térmicas à placa em conjunto com a carga que representa o peso da camada de clínquer sobre a placa, tendo-se efetuado o ensaio novamente. Os resultados obtidos neste ensaio são os que se podem observar nas imagens ilustradas na Figura 72.

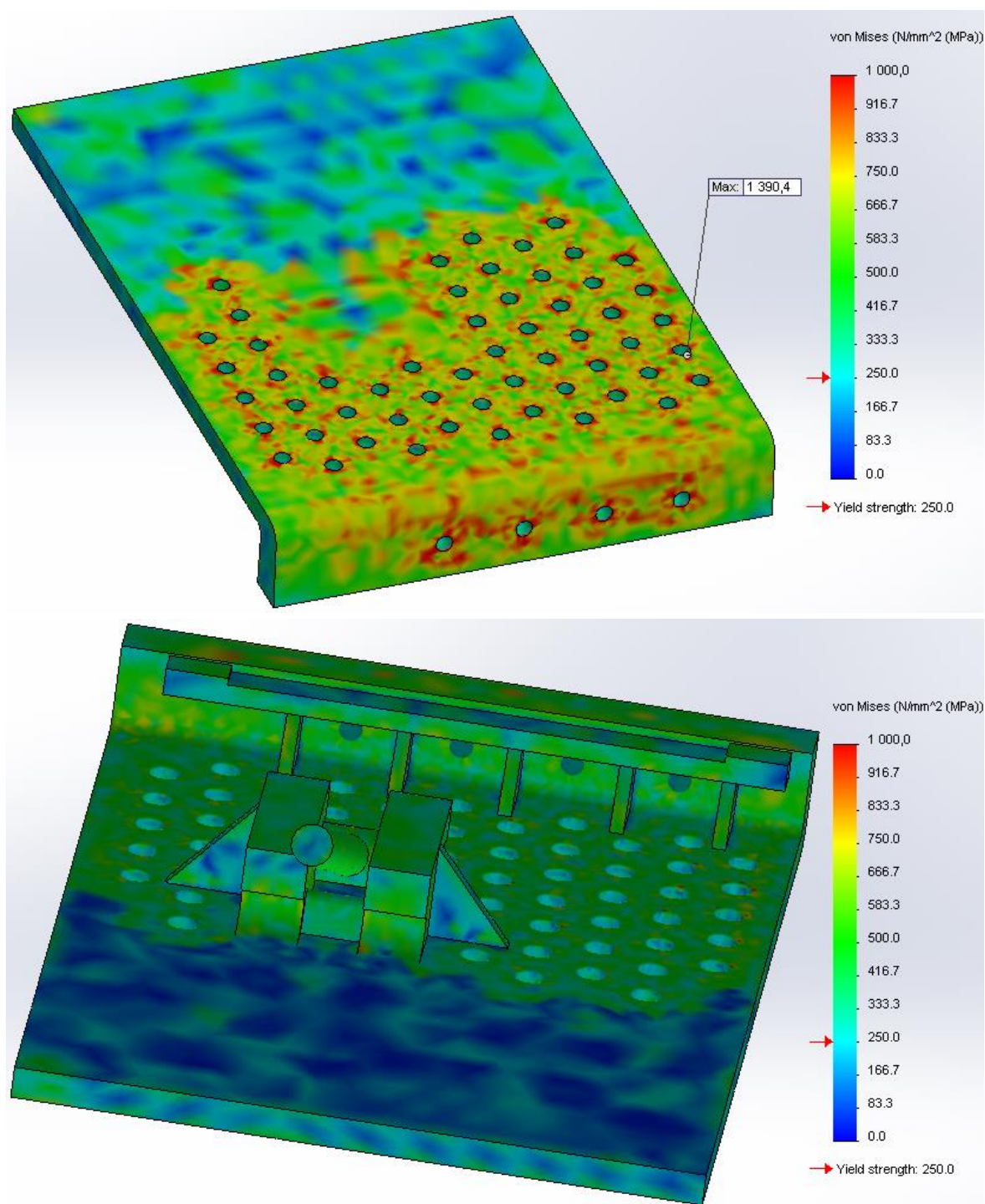


Figura 72 - Resultados do Ensaio Estático Realizado à Montagem da Placa Proposta com todas as cargas aplicadas.

Examinando agora as imagens da Figura 72, podemos constatar que, como era já esperado, na parte superior da placa as zonas ao redor dos furos continuam a ser zonas críticas e que podem originar a falha da placa, sendo que é num desses furos que se faz apresentar a tensão máxima sofrida pela placa neste ensaio, cujo valor é de 1390,4 MPa.

Também como se tinha já previsto, os furos efetuados na frente da placa criam realmente zonas de concentração de tensões ao seu redor na zona em contacto com o clínquer, mas atentarmos agora na zona desses furos em contacto com o ar de arrefecimento, podemos observar que existe uma predominância da cor verde nessa zona e que não existem pontos a vermelho nessa zona, isto é, pontos em que todos os limites do material utilizado na placa teriam sido ultrapassados e que poderiam causar a falha desta.

Parte da responsabilidade para que não hajam zonas de valor igual ou superior ao estabelecido na escala das tensões, dever-se-á aos reforços implementados nessa zona por forma a garantir a integridade mecânica da placa.

Já na zona do apoio de fixação, tendo sido aumentada a secção deste e acrescentadas duas nervuras, existe uma menor quantidade de pontos acima do limite estabelecido para este ensaio quando comparada à mesma zona da placa sem estas alterações. Esta comparação bem como algumas outras serão efetuadas no ponto 6.2.4.3.

Também é certo que, tal como o ensaio feito à placa lateral esquerda sem alterações, este é um ensaio estático onde não se consegue reproduzir a 100% o efeito da passagem do ar entre a placa, nem se consegue reproduzir o movimento que é implementado a algumas das placas, mas como ficou comprovado no ensaio anterior as zonas críticas que poderão levar à falha da placa são bastante aproximadas às que se assintem na realidade.

6.2.4.3 Comparação de Resultados

Concluídos os ensaios de ambas as placas, é então o momento de fazer comparações entre os ensaios e tecer algumas conclusões sobre os resultados obtidos.

Como início desta comparação, serão debatidas as diferenças e semelhanças dos resultados obtidos na parte superior e frontal de ambas as placas, resultados esses que são expostos nas imagens da Figura 73.

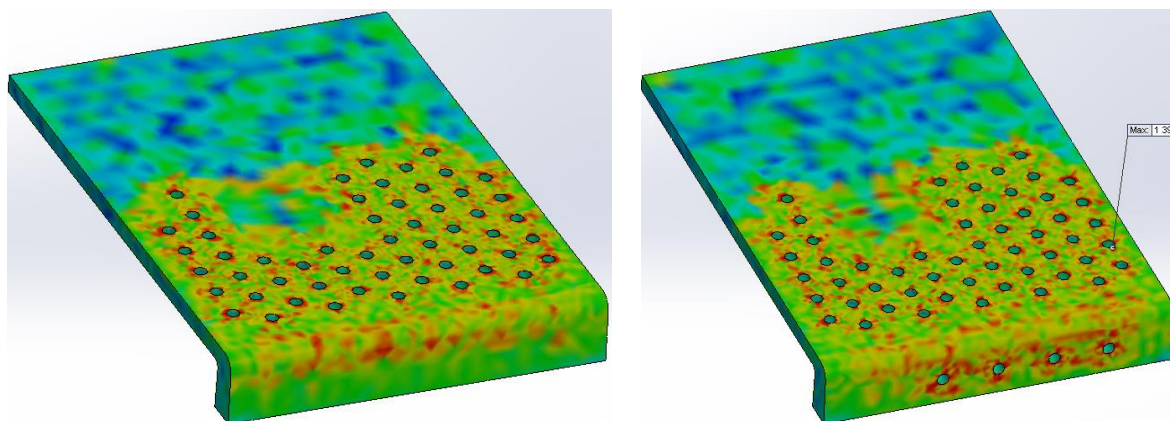


Figura 73 - Comparação dos Resultados Obtidos para Ambas as Placas na sua Zona Superior

Observando as imagens imediatamente da Figura 73, é possível reparar que ambas as placas têm um comportamento semelhante, sendo que as diferenças mais notórias estão nas zonas onde realmente foram realizadas alterações.

É particularmente evidente a influência dos furos na zona frontal da placa, onde como já era esperado criam zonas com tensões mais elevadas, embora também se possa dizer que já existiam tensões semelhantes pouco acima da zona onde estes foram efetuados. Uma das medidas tomadas para compensar este efeito foi o prolongamento do reforço na zona frontal, reforço esse, que como poderá ser visto mais à frente deu os seus frutos.

Outra situação onde se nota alguma diferença é na zona da placa que se situa por cima do apoio, onde se pode reparar que existe um nível de tensões acima do que é patente na placa sem alterações. Esta diferença poderá então decorrer do acrescento das duas nervuras nessa zona, o que significa também que estas deverão estar a cumprir a função para a qual foram aplicadas ao desviarem algumas das tensões sofridas pela placa para uma zona em que esta tem maior suporte.

Analisada a parte superior de ambas as placas, era então altura de comparar a zona inferior que não se encontra em contacto com o clínquer. Para tal, são expostas na Figura 74 duas imagens que o permitem fazer.

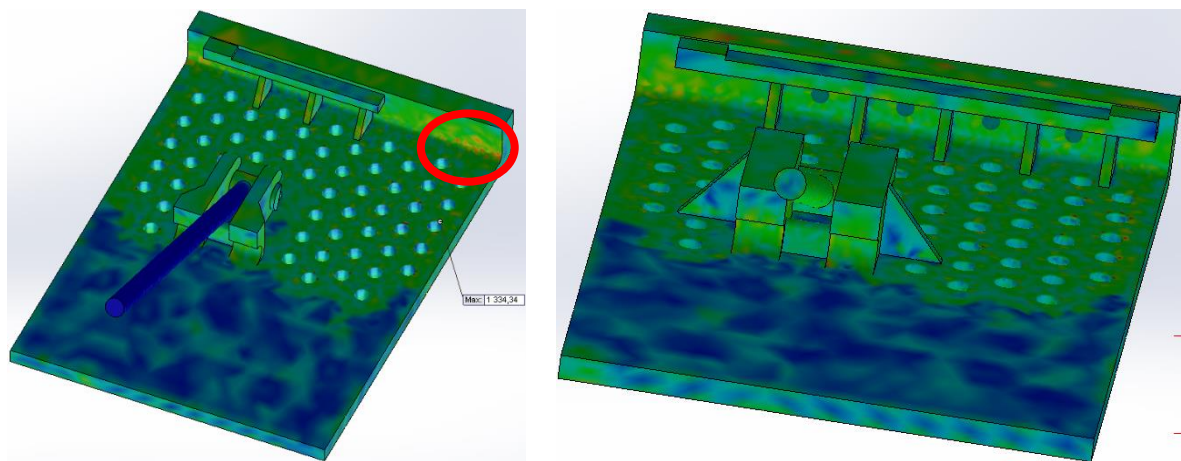
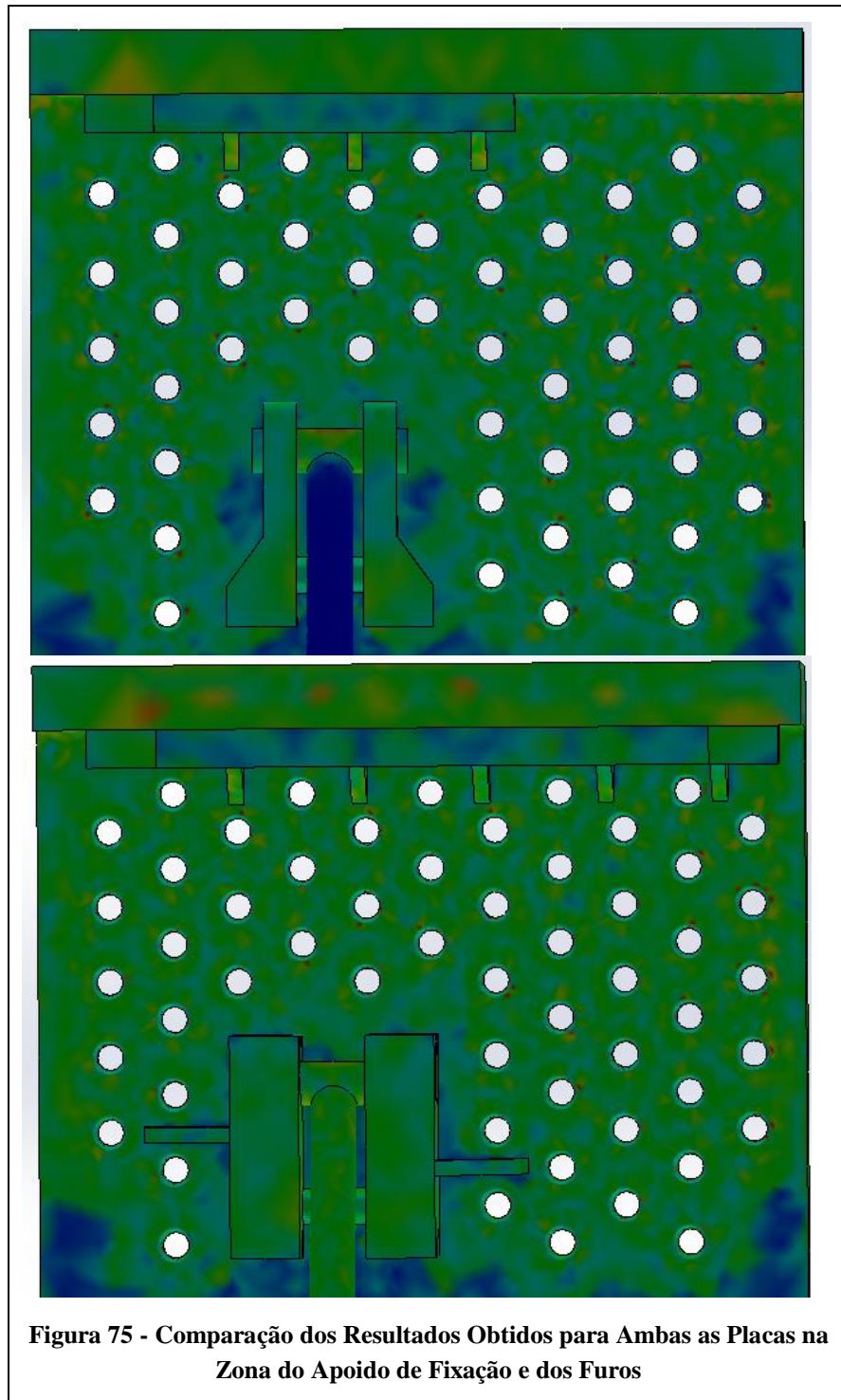


Figura 74 – Comparação dos Resultados Obtidos para Ambas as Placas na sua Zona Inferior

Olhando agora para as imagens da Figura 74, é possível observar que na zona dos furos em contacto com o ar de arrefecimento insuflado não se fazem notar tensões mais elevadas que as presentes na placa sem alterações, havendo até uma ligeira melhoria na zona em que foram acrescentados os reforços, não existindo na placa proposta a concentração de tensões acima do limite que se verifica na placa na placa utilizada de momento e que estão assinaladas na imagem.

Seguidamente, e por forma a ser mais fácil a identificação das diferenças que são mencionadas na continuação deste texto, são apresentadas duas imagens ampliadas na Figura 75 com a zona dos furos e do apoio.



Através das imagens da Figura 75, é então possível reparar pelas cores representantes das tensões que se fazem notar que na generalidade ao redor do apoio alterado não houve um aumento de tensões quando comparado ao apoio sem alterações. É ainda de assinalar que na zona das nervuras acrescentadas também se nota uma ligeira melhoria, o que se verifica também nos furos ao seu redor, onde não existem tantos pontos de concentração acima do limite estabelecido.

Assim, é possível afirmar que existem, ainda que ligeiros, sinais de melhoria da placa proposta em relação à placa que se encontra em utilização, havendo também um ponto negativo a mencionar, o aumento de tensões na parte frontal da placa devido aos furos.

Por fim, foi calculada a diferença de preço entre as placas com base na massa e no preço da placa lateral esquerda utilizada de momento. O preço unitário médio de uma placa lateral esquerda, segundo a consulta efetuada no programa utilizado pela fábrica onde é mantido o registo das encomendas feitas e os seus preços, é de 102€. Já a massa desta mesma placa, calculado no programa SOLIDWORKS, é de aproximadamente 16,2 kg.

Assim, recorrendo ao mesmo *software* sabe-se que a massa da placa aqui proposta como alternativa é de 16,83 kg, logo, o seu preço unitário será de aproximadamente 106€, o que representa um aumento do custo por placa em 4€.

Posto isto, e apesar de existirem alguns indicadores de melhoria, caso se opte pela utilização da placa aqui proposta será prudente numa primeira fase a utilização de apenas algumas placas com esta configuração para ensaio nas zonas identificadas pelo ficheiro Excel de controlo e monitorização da substituição de placas, apresentado no ponto 6.2.3, como zonas em que existe uma elevada taxa de substituição de placas. Posteriormente, caso o ensaio tenha um resultado positivo e que se verifique que compensa a diferença de preço da placa pelas vantagens que possui, deverá então mudar-se definitivamente o desenho da placa lateral esquerda.

Poderá ainda haver a hipótese de utilizar em conjunto tanto a placa em vigor como a que aqui se propõe, criando assim uma solução de compromisso entre a duração em serviço e o preço de cada uma.

Por ultimo, apenas referir que sendo esta placa simétrica à placa lateral direita, todos os ensaios e conclusões aqui apresentados são também validos para essa placa.

6.3. Processo de Arrefecimento do Clínquer por Injeção de Água

Algumas das soluções propostas nos pontos anteriores permitem, até um certo ponto, uma melhoria no arrefecimento do clínquer caso sejam aplicadas, sendo exemplo disso mesmo o aumento da relação de transmissão dos ventiladores 1 e 3, resultado da seleção de correias de otimização e que tem como efeito o aumento, ainda que ligeiro, da gama de caudal que lhes é possível insuflar, e a placa lateral esquerda proposta como alternativa à utilizada de momento, que tem uma maior capacidade para arrefecer o clínquer, fruto do aumento do número de orifícios da placa estudada.

Apesar de estas soluções conseguirem melhorar a eficácia com que se arrefece o clínquer, de uma forma mais ou menos direta e com maior ou menor impacto, foi ainda realizado um balanço térmico ao arrefecedor 8 da linha 5 na tentativa de perceber se haveria possibilidade de outras melhorias que permitissem um melhor arrefecimento do clínquer.

Para que pudesse ser realizado este balanço estabeleceram-se as variáveis de entrada e de saída do sistema, que se considera fechado, que podem ser observadas no esquema representado na Figura 76, e procedeu-se à recolha dos valores médios que correspondentes a essas variáveis durante o período de 12 horas estabelecido para o balanço, sendo que, parte dos valores foram obtidos através do programa utilizado para a monitorização da linha de produção e os restantes foram medidos e registados localmente.

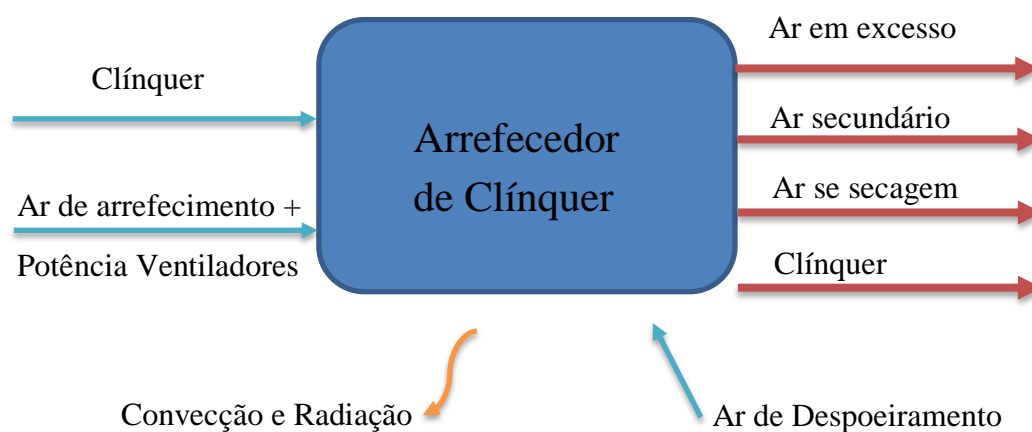


Figura 76 – Esquema das Entradas e Saídas do Arrefecedor de Clínquer

Os registos das medições feitas localmente foram acompanhadas pelo aluno e executadas por colaboradores pertencentes ao Centro Técnico Corporativo da Secil, os quais têm acesso às ferramentas necessárias para efetuar as medições pretendidas e a formação necessária para o manuseamento das mesmas, onde todas as medições de velocidade e caudal volumétrico foram realizadas de acordo com a norma ISO 16911-1:2013(E).



Figura 77 - Medições Efetuadas Localmente para o Balanço Energético

Na Figura 77, à esquerda, podemos ver o exemplo da medição da pressão diferencial e da temperatura do ar de excesso no troço da conduta da chaminé após a saída do arrefecedor, onde para a medição da temperatura foi utilizada uma sonda PT100 e para medição da pressão diferencial foi utilizado um tubo de Pitot, sendo ambos os instrumentos visíveis na imagem. Já na figura da direita é possível observar o material de armazenamento dos valores que estão a ser medidos.

Com o valor da pressão diferencial é possível, segundo a norma [15], saber-se a velocidade do ar em escoamento dentro de uma conduta através da fórmula que se apresenta de seguida.

$$u = K \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}} \quad (14)$$

Onde:

- u é a velocidade do escoamento em m/s.
- K é a constante do tubo de Pitot (0,84 para o Pitot utilizado).
- Δp representa a pressão diferencial em Pa.
- ρ é a densidade do gás em escoamento na conduta em kg/m³.

Por sua vez, a densidade do gás em escoamento referida na fórmula anterior pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{MM \times p_c}{R \times T_c} \quad (15)$$

Onde:

- ρ é a densidade em kg/m³.
- MM representa a massa molar do gás escoado em kg/mol.
- R é a constante dos gases perfeitos, que tem como valor 8,314J/(K mol).
- T_c representa a temperatura do gás na conduta em K.
- p_c é a pressão absoluta na conduta em Pa.

Para a medição da temperatura do clínquer foram utilizados dois métodos. Um deles foi a utilização de uma pistola de infravermelhos para medir a temperatura do clínquer logo à saída do arrefecedor, o outro foi um método mais elaborado e que é descrito em baixo.

Num termo, considerado como um sistema adiabático, eram colocados 2 litros de água e medida a sua temperatura. Posteriormente, era recolhida uma amostra de clínquer à saída do arrefecedor e colocada dentro do termo, onde transferia o seu calor para a água lá existente. Esta transferência de calor era monitorizada através de um termómetro, e quando a temperatura da água começa-se a estabilizar era retirado esse valor de temperatura da água.

Deste modo, e recorrendo à equação (16) foi possível chegar ao valor do calor da água depois da transferência de calor que se deu entre o clínquer e a água.

$$Q = w \times c_p \times \Delta T \quad (16)$$

Onde:

- Q é a potência térmica da variável medida em kJ/kg.
- w é o caudal mássico do material/fluido em kg/s.
- c_p representa o calor específico do material/fluido em kJ/kg.°C.
- ΔT é a diferença de temperaturas do material cujo calor se está a calcular em °C.

Podemos então agora, aplicando o mesmo raciocínio, calcular a temperatura do clínquer à saída do arrefecedor através da seguinte equação:

$$T_{clínquer\ saída} = \left(\frac{m_{água} \times c_{p_{água}} \times (T_{mistura\ final} - T_{água\ inicial})}{m_{clínquer} \times c_{p_{clínquer}}} \right) \div T_{mistura\ final} \quad (17)$$

Onde:

- $T_{clínquer\ saída}$ é a temperatura do clínquer à saída do arrefecedor em K.
- $m_{água}$ é a massa específica da água em m³/kg.
- $m_{clínquer}$ é a massa específica do clínquer em m³/kg.
- $T_{mistura\ final}$ representa a temperatura final da mistura de água e clínquer em K.
- $T_{água\ inicial}$ é a temperatura inicial da água em K.
- $c_{p_{clínquer}}$ é o calor específico do clínquer em kJ/kg.K.
- $c_{p_{água}}$ é o calor específico da água em kJ/kg.K.

Assim, os valores resultantes das medições efetuadas localmente e os reunidos através do programa de monitorização da linha de produção são apresentados na tabela imediatamente abaixo.

Tabela 28 - Valores Considerados para o Balanço Energético

	<i>Caudal</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Calor Específico</i>
<i>Ar de Arrefecimento</i>	146412 Nm ³ /h	20 °C	1,3 kJ/Nm ³ ×°C
<i>Ar de Despoeiramento</i>	3024 Nm ³ /h	32 °C	1,3 kJ/Nm ³ ×°C
<i>Ar de Excesso</i>	92748 Nm ³ /h	253 °C	1,31 kJ/Nm ³ ×°C
<i>Ar Secundário</i>	55269,95 Nm ³ /h	657 °C	1,37 kJ/Nm ³ ×°C
<i>Ar de Secagem de Combustível</i>	1407,1 Nm ³ /h	470 °C	1,34 kJ/Nm ³ ×°C
<i>Clínquer à Entrada</i>	50265 kg/h	1400 °C	1,09 kJ/kg clínquer×°C
<i>Clínquer à Saída</i>	50265 kg/h	92 °C	0,78 kJ/kg clínquer×°C

Os valores do calor específico exibidos na tabela 28 foram retirados dos gráficos presentes nos anexos XXVII e XXVIII.

O cálculo do caudal volúmico do ar secundário apresentado na tabela acima é efetuado através da seguinte equação:

$$V_{Ar\ secundário} = V_{Ar\ arrefecimento} + V_{Ar\ despoeiramento} - (V_{Ar\ excesso} + V_{Ar\ secagem}) \quad (18)$$

Onde:

- $V_{Ar\ secundário}$ é o caudal volúmico do ar secundário em Nm³/h.
- $V_{Ar\ arrefecimento}$ é o caudal volúmico do ar de arrefecimento em Nm³/h.
- $V_{Ar\ despoeiramento}$ é o caudal volúmico do ar de despoeiramento em Nm³/h.
- $V_{Ar\ excesso}$ é o caudal volúmico do ar de excesso em Nm³/h.
- $V_{Ar\ secagem}$ é o caudal volúmico de secagem de combustível em Nm³/h.

Assim, faltava apenas realizar os cálculos das perdas térmicas por radiação e por convecção do arrefecedor de clínquer para o ar ambiente. Para que tal fosse possível, foram considerados o valor médio de 33 °C para a superfície do arrefecedor em contacto com o ar ambiente, o valor de 138 m² de área total dessa superfície de permuta e o valor de 20 °C para a temperatura do ar ambiente.

Os cálculos efetuados correspondentes a esta temática podem então ser realizados, conforme [10], segundo as equações que se apresentam de seguida.

$$Q_{\text{Radiação}} = 4 \times 10^{-8} \times (T^4 - T_0^4) \times 4,187 \times \text{Area} \quad (19)$$

$$Q_{\text{Convecção}} = 80,33 \times \left(\frac{T + T_0}{2} \right)^{-0,724} \times (T - T_0)^{1,333} \times 4,187 \times \text{Area} \quad (20)$$

Onde:

- $Q_{\text{Radiação}}$ representa as perdas térmicas por radiação em kJ/h.
- $Q_{\text{Convecção}}$ representa as perdas térmicas por convecção em kJ/h.
- T é a temperatura média da superfície em K.
- T_0 é a temperatura média ambiente em K.
- Area, representa a área da superfície cujas perdas se estão a calcular em m².

Para este balanço não foi considerado que existisse ar falso, ar este que entra por exemplo em zonas onde hajam fissuras em condutas, tendo em conta os limites que foram estabelecidos.

Posto isto, e tendo também em conta a potência elétrica utilizada pelos ventiladores de insuflação do ar de arrefecimento no valor de 145kW, é então possível realizar o balanço energético, cujos resultados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 29 - Resultados do Balanço Energético

Balanço Energético				
	kJ/kg clínquer	%	Somatório (kJ/kg clínquer)	Desvio
Ar de Arrefecimento + Ar de despoeiramento + Potência Eléctrica	10,7	0,7	1512,8	0
Clínquer à Entrada	1502	99,3		
Ar de Excesso	532,6	35,2	1512,9	
Ar de Secagem de Combustível	16	1,1		
Ar secundário	907,5	60		
Clínquer à Saída	55,7	3,7		
Convecção e Radiação	1	0,1		

Olhando agora para o gráfico exposto de seguida é então possível perceber que a maior parte da energia é recuperada, principalmente no ar secundário, embora ainda haja uma grande porção que é rejeitada no ar de excesso e que não é recuperada.

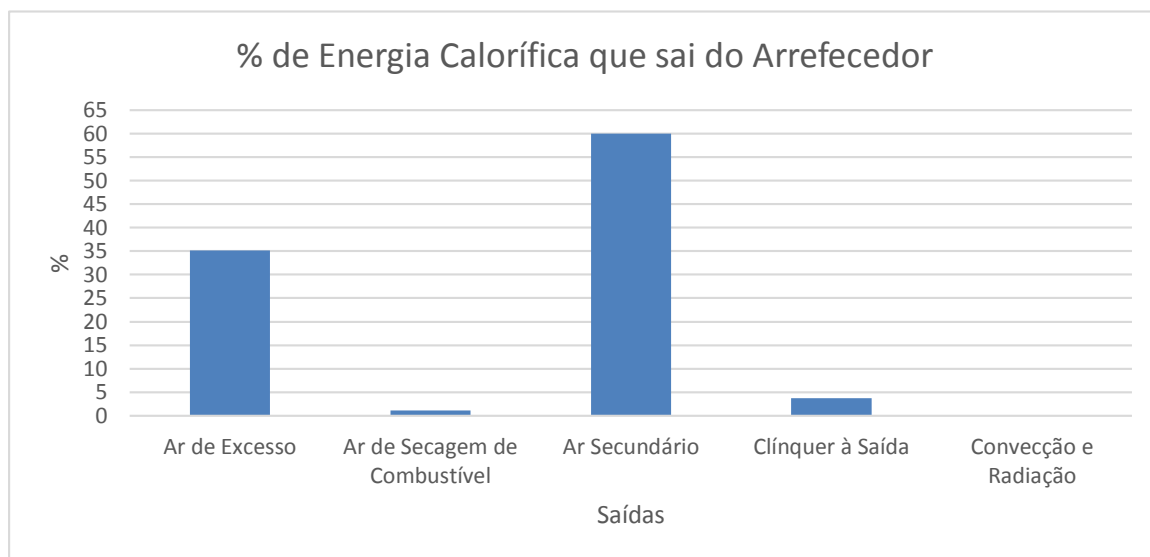


Figura 78 – Distribuição da Energia Calorífica Arrefecedor

Realizado o balanço é então agora possível determinar a sua eficiência. Para tal, é necessário ter em conta todas as energias de entrada e de saída do arrefecedor, uma vez que, a eficiência do arrefecedor é estabelecida pela relação entre o calor que se consegue recuperar e todo o calor que entrou no arrefecedor.

Assim, o cálculo da eficiência, segundo [14], é possível definir-se e ser determinado através das seguintes equações:

$$\eta = \frac{\text{Calor Recuperado}}{\text{Calor de entrada}} \times 100 \quad (21)$$

$$\eta = \frac{Q_{Ar \text{ secundário}} + Q_{Ar \text{ ar de secagem}}}{Q_{Ar \text{ clínquer entrada}} + Q_{Ar \text{ de arrefecimento+energia eléctrica}} + Q_{Ar \text{ despoeiramento}}} \times 100 \quad (22)$$

Posto isto, e segundo a equação 22 é então executável o cálculo da eficiência do arrefecedor de clínquer 8 da linha 5:

$$\eta = \frac{907,5 + 16}{1502 + 9,82 + 0,89} \times 100 = 61\%$$

Sendo que os valores teóricos de eficiência de um arrefecedor de grelha de primeira geração são situados entre os 60 e os 70%, este arrefecedor, ainda que por uma margem muito ténue, encontra-se dentro desse parâmetro teórico que lhe é associado.

Este balanço, como referido anteriormente, foi realizado com o intuito de se fazer uma possível alteração que permitisse uma melhoria no arrefecimento do clínquer. Essa alteração seria a

utilização de um *spray* de água na zona terminal dos arrefecedores de clínquer, havendo assim a possibilidade de fazer um melhor arrefecimento do clínquer sem ser necessária a insuflação de tanto ar de arrefecimento, poupando no consumo elétrico dos ventiladores de insuflação e ainda também no consumo elétrico do ventilador de extração da chaminé, uma vez que a quantidade necessária de ar a extrair diminuiria.

Esta medida levaria ainda à redução da temperatura ar de excesso que é rejeitado pela chaminé. Ao fazê-lo, poupar-se-ia ainda também no consumo elétrico dos ventiladores do permutador de calor que arrefece o ar que sai do arrefecedor até a uma temperatura inferior à que os filtros que fazem o despoeiramento do ar de excesso suportam.

Não havendo bibliografia que oferecesse suporte para o cálculo de um sistema deste tipo, na procura de soluções a este nível foi contactada uma empresa que oferece no seu portfólio um sistema deste género, mas sem sucesso.

Assim, recorrendo aos conhecimentos adquiridos ao longo do seu percurso académico, foi realizada pelo aluno uma breve e simples análise à aplicação do sistema de *spray* de água com o intuito de chegar a alguns valores representativos dos custos de instalação e de poupança com esta aplicação, bem como o custo/retorno do investimento a fazer. Este estudo é então apresentado em 6.3.1.

6.3.1. Dimensionamento e Cálculo dos Custos de Implementação do Sistema de Injeção de Água

Dada a sensibilidade do processo e o reaproveitamento dos gases quentes que é feito ao longo do arrefecedor, um sistema deste tipo nunca poderia ser utilizado na zona da primeira e início da segunda grelha. Assim, foi estabelecido que o sistema teria de ser aplicado na zona final da segunda grelha, zona essa que é arrefecida com o ar insuflado pelo ventilador 5.

Para calcular o calor que seria necessário retirar ao clínquer com o *spray* de água, foi contemplada a temperatura de 250 °C para o clínquer à entrada da zona de arrefecimento correspondente à câmara do ventilador 5 e a temperatura de 92 °C para o clínquer à saída da segunda grelha, e portanto à chegada ao britador de clínquer. Foi ainda considerado que o ventilador 5 estaria parado, ou seja, que a insuflação de ar nessa zona seria nula,

Recorrendo ao anexo XXVII, para a temperatura de 250 °C o clínquer apresenta um calor específico de 0,849 kJ/kg.°C e para a temperatura de 92 °C apresenta um calor específico de 0,78 kJ/kg.°C.

Tendo em conta que a massa de clínquer processada pelo arrefecedor são aproximadamente 14,76 kg/s, é então possível através da equação 16 calcular o calor necessário que o *spray* de água tem de ser capaz de retirar.

$$Q = w_{clinker} (c_{p_{clinker\ 250^{\circ}C}} \times 250 - c_{p_{clinker\ 92^{\circ}C}} \times 92) = 1979,94\ kJ/s$$

Por forma a conseguir calcular o caudal mássico de água a injetar, foi considerada a temperatura de 12 °C para essa mesma água.

Assim, e recorrendo a tabelas termodinâmicas, é possível extrair os valores de entalpia da água saturada a 12 °C, a entalpia da água saturada a 100 °C e da entalpia de evaporação da água a 100 °C, sendo estes valores: 50,406 kJ/kg, 419,17 kJ/kg e 2256,4 kJ/kg respetivamente.

Assim, a entalpia da água a utilizar para o cálculo do caudal mássico de água necessária para o arrefecimento é:

$$\begin{aligned} h_{\text{água}} &= h_{\text{evap a } 100^{\circ}\text{C}} + h_{\text{sat a } 100^{\circ}\text{C}} - h_{\text{sat a } 12^{\circ}\text{C}} \\ &= 2625,16 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Através da equação 16 é então possível calcular o caudal mássico de água necessário para colmatar as necessidades apuradas.

$$w = 0,75 \text{ kg/s}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Consultando ainda as tabelas termodinâmicas é ainda possível retirar o valor do volume específico da água no estado líquido saturado, que para a temperatura de 12 °C é 0,001 m³/kg. Assim, é possível apresentar o caudal mássico na forma de 0,00075 m³/s, ou 2,7 m³/h.

De modo a dar início ao dimensionamento do sistema de *spray* de água e seleção dos equipamentos e materiais necessários para o mesmo, começou-se por fazer a seleção dos pulverizadores que serão responsáveis pela criação do *spray* de gotículas de água de muito pequena dimensão, facilitando a evaporação dessa água com o calor se dê o mais rápido possível e se consiga retirar a quantidade de calor desejada ao ar e consequentemente ao clínquer.

Para a seleção do tipo de pulverizador, foi então consultado um catálogo presente em [40]. Nesse catálogo, a consulta do caudal de água que um determinado pulverizador consegue debitar a uma determinada pressão é feita em litros por minuto, assim sendo, foi necessário converter os 2,7 m³/h calculados anteriormente. O resultado dessa mesma conversão são 45 l/min.

Sabendo agora as necessidades requeridas aos pulverizadores nas unidades que permitiam fazer a seleção no catálogo, o tipo de pulverizador selecionado é o que se encontra apresentado na tabela seguinte.

Tabela 30 - Tipo e características do pulverizador selecionado

<i>Pulverizador Bx 3/8"</i>	
<i>Inlet Conn. (in.)</i>	3/8"
<i>Capacity size</i>	20
<i>Inlet Ø Nom.</i>	7,1 mm
<i>Orifice Ø Nom.</i>	6,4 mm
<i>Spray angle at 6 bar</i>	74°
<i>Flow rate capacity at 6 bar</i>	22 l/min
<i>Flow rate capacity at 7 bar</i>	24 l/min

Selecionado o tipo de pulverizador a utilizar, e sabendo agora que são necessários apenas 2 pulverizadores com o fluido escoado no circuito a uma pressão de 6,25 bar para colmatar as necessidades existentes, a próxima fase seria fazer o dimensionamento do circuito do sistema de injeção de água, para tal, foram consideradas as seguintes condições iniciais:

- Caudal total de 2,7 m³/h ou 0,00075 m³/s;
- Caudal de 22,5 l/min por cada pulverizador;
- Tubagem em aço galvanizado, $\varepsilon = 0,15$ mm;
- Velocidade do escoamento de 3 m/s dentro da tubagem.

Com as condições acima apresentadas em mente, e tendo em conta o desenho proposto para a tubagem e o restante sistema apresentado no anexo XXX, sistema este a ser implementado a 2,5 m do fim da segunda grelha, o próximo passo foi então dimensionar a tubagem que seria necessária para o caudal pretendido. Também aqui foram feitas duas considerações. À saída da bomba do circuito foram assumidos um caudal de 0,00075 m³/s e uma velocidade de escoamento de 3 m/s, e a partir da divisão da tubagem para cada um dos pulverizadores, foi considerado um caudal de 0,000375 m³/s e uma velocidade de 3 m/s.

Deste modo, e recorrendo à equação seguinte, foram então selecionados os diâmetros de tubo necessários para os caudais pretendidos.

$$V = u \times A \quad (23)$$

Onde:

- V é o caudal volúmico em escoamento, em m³/s;
- u é a velocidade média do escoamento em m/s;
- A representa a área da secção da tubagem necessária em m².

Assim, e após realizados os cálculos, para o troço que vai da bomba até à divisão do circuito a tubagem necessária teria de ter o mínimo de 17,84 mm de diâmetro interno, o que após consultar [35], se chegou à conclusão que teria de ser um tubo de 3/4". Já para os troços após a divisão do circuito, foi calculado que o diâmetro interno mínimo para a tubagem teria de ser igual ou superior a 12,6 mm, pelo que consultando [pinto e cruz], resulto na seleção de uma tubagem de 3/8" para esses troços.

Selecionada a tubagem necessária para o caudal pretendido, era então chegada altura de calcular a perda de carga de todo o circuito após bomba, para que posteriormente se pudesse selecionar essa mesma bomba com as características necessárias para esta aplicação. Os resultados para cada um dos troços e os acessórios contabilizados para o cálculo cada um desses mesmos troços são apresentados na tabela 32 e foram atingidos utilizando as equações abaixo indicadas.

$$p = \rho \times g \times H \quad (24)$$

Onde:

- p representa a pressão em Pascal;
- ρ representa a densidade;
- g representa a aceleração da gravidade;
- H representa a altura manométrica em metros.

$$Re = \frac{u \times \varnothing}{\vartheta} \quad (25)$$

Onde:

- Re representa o número de Reynolds;
- u representa a velocidade do escoamento em m/s;
- \varnothing representa o diâmetro da tubagem em metros;
- ϑ representa a viscosidade cinemática em m²/s.

$$h_f = \left(\frac{\lambda \times L}{\varnothing} + \Sigma k \right) \times \frac{u^2}{2 \times g} \quad (26)$$

Onde:

- h_f representa a perda de carga calculada em m.c.a., em escoamentos com regimes turbulentos;
- λ representa o valor do coeficiente de atrito retirado do diagrama de Moody (Anexo XXXI);
- \varnothing é o diâmetro da tubagem em metros;
- Σk é o somatório das perdas de carga por acessório em comprimento equivalente de tubagem linear, retirados de [34];
- u representa a velocidade média do escoamento em m/s;
- g representa a aceleração da gravidade.

Os resultados foram então os que se encontram expostos na tabela seguinte, sendo que os pulverizadores não foram contabilizados nos cálculos efetuados, uma vez que a pressão desejada é imediatamente antes dos pulverizadores, uma vez que são estes que necessitam dessas condições pressão para debitar o caudal estabelecido neste dimensionamento do circuito.

Tabela 31 - Acessórios e valores contabilizados nos cálculos de perda de carga do circuito

<i>Acessórios e valores contabilizados no troço 1</i>	<i>Acessórios e valores contabilizados nos troços 2 e 3</i>
Tubagem de 3/4" com comprimento de 4 metros	Tubagem de 3/8" com comprimento de 1,55 metros
Diferença de altura de -1 metro	Diferença de altura de -1 metro
Válvula anti-retorno	Curva 3/8" a 90°
Tê de redução 3/8"-3/4"-3/8"	Caudal de 0,000375 m ³ /s
Curva 3/4" a 90°	
Casquilho duplo de redução de 1" para 3/4"	
Caudal de 0,00075 m ³ /s	

Tabela 32 - Resultados dos cálculos de perda de carga no circuito

<i>Resultados dos cálculos de perda de carga no circuito</i>	
<i>Troço 1</i>	3,3565 m.c.a.
<i>Troço 2</i>	1,1014 m.c.a.
<i>Troço 3</i>	1,1014 m.c.a.
<i>Total</i>	<i>5,56 m.c.a.</i>

Através da equação 24, e considerando a massa específica da água 1000 kg/m³, podemos então decompor o valor de 5,56 m.c.a. em 54543,6 Pa, ou 54,54 kPa. Para finalmente selecionar a bomba é preciso somar este valor de pressão ao exigido pelos pulverizadores, para tal, converteu-se o valor em kPa para bar, do qual resultou o valor de 0,55 bar. Assim, o valor de pressão mínimo que a bomba terá de ser capaz de atingir é de 6,8 bar.

Posto isto, recorreu-se a [24] para fazer a seleção da bomba, onde a escolhida foi a CRE 3-11, que consegue satisfazer as necessidades do sistema, e se necessário tem ainda capacidade para reagir a uma exigência maior que seja feita ao sistema. As curvas da bomba selecionada podem ser consultadas no anexo XXXII.

De seguida, e tal como apresentado na tabela seguinte, foi feito o cálculo do investimento a fazer para a implementação do sistema aqui apresentado.

Tabela 33 - Custo do investimento a fazer para a implementação do sistema de injeção de água

<i>Custo de implementação do sistema de injeção de água</i>	
<i>Tubo galvanizado 1"</i>	3×4,75€ + IVA
<i>Tubo galvanizado 3/4"</i>	4×3,3€ + IVA
<i>Tubo galvanizado 3/8"</i>	4×2,27€ + IVA
<i>Válvula de seccionamento 1"</i>	8,95€ + IVA
<i>Válvula anti-retorno 1"</i>	13,11€ + IVA
<i>Válvula anti-retorno 3/4"</i>	5,24€ + IVA
<i>Filtro 1"</i>	13,73€ + IVA
<i>Tê de redução 3/8"-3/4"-3/8"</i>	4,46€ + IVA
<i>Curva 90° 3/4"</i>	3,21€ + IVA
<i>Curva 90° 3/8"</i>	2×2,51€ + IVA
<i>Flange 1"</i>	2×5,95€ + IVA
<i>Casquilho duplo de redução de 1" para 3/4"</i>	2,1€ + IVA
<i>Pulverizadores</i>	2×7,5€ + IVA
<i>Bomba</i>	2749€ + IVA
<i>Mão-de-obra</i>	400€ + IVA
<i>Total</i>	3275,74€ + IVA

Consultando então as curvas da bomba no anexo XXXII, podemos observar que com o caudal exigido para que o sistema consiga ir de encontro às necessidades de arrefecimento, a potência absorvida pela bomba é de aproximadamente 0,11 kW, que quando comparada à potência média de 13 kW absorvida pelo ventilador, é uma redução extrema de 99,15% na potência consumida.

Assim, e considerando um custo de investimento para a implementação deste sistema de 3500€, prevendo algum imprevisto, e o preço médio do kWh de 0,0889€, recorrendo a [33], foi então possível calcular o *payback* da implementação do sistema de injeção de água.

A diferença no consumo entre o ventilador e a bomba é então de 12,89 kWh, o que se traduz numa poupança horária de 1,146€, diária de 27,5€ e mensal de aproximadamente 825€. Assim sendo, a implementação deste sistema estaria paga ao fim de 128 dias ou aproximadamente 4 meses e 2 semanas.

Posto isto, é de realçar que a poupança aqui mencionada é possível pelo acesso gratuito a uma abundante quantidade de água dentro das instalações da fábrica.

Como análise final, há que mencionar que não poderá existir a possibilidade de parar totalmente o ventilador 5, uma vez que, se deixasse de haver ar insuflado em qualquer parte das grelhas as placas que as compõem simplesmente não seriam capazes de suportar as temperaturas do clínquer e acabariam por ceder muito rapidamente.

Deste modo, fica como proposta para um trabalho futuro, o estudo da interação entre o sistema de injeção de água e a quantidade de ar insuflado pelo ventilador 5 e possivelmente também a quantidade de ar insuflada pelo ventilador 4, comparando no final o balanço térmico resultante de todo o sistema de arrefecimento de clínquer do arrefecedor com o sistema de injeção de água com o balanço térmico aqui apresentado neste trabalho.

7. OUTROS TRABALHOS REALIZADOS

Além do trabalho realizado direcionado para o objetivo principal do estágio e deste relatório, a otimização dos custos operacionais do arrefecedor de clínquer, foram ainda seguidos de perto e elaborados outros trabalhos.

Seguidamente, são então destacados de uma forma muito superficial alguns dos trabalhos realizados pelo aluno e que de uma forma ou de outra foram mais marcantes e representaram experiências únicas no ramo em que foi concretizado o estágio.

1. Substituição de Virolas no Forno da Linha 5



Figura 79 - Substituição das Virolas do Forno



Figura 80 - Processo de Soldadura Realizado nas Virolas e Confirmação da Soldadura por Ultrassons



Figura 81 - Resultado Final da Substituição das Virolas do Forno

A mudança de um ou mais troços de virola do forno é uma das intervenções que raramente acontecem, e portanto, foi com satisfação que o aluno acompanhou todo o processo.

Os procedimentos num serviço deste calibre são decerto dos mais exigentes a todos os níveis, bastando uma pequena falha para tudo correr muito mal muito depressa, desde as manobras realizadas pelas gruas enquanto suportavam toneladas de aço até ao processo de soldadura onde um pequeno defeito pode ser catastrófico dada a escala dos equipamentos.

2. Alinhamento do Forno da Linha 5

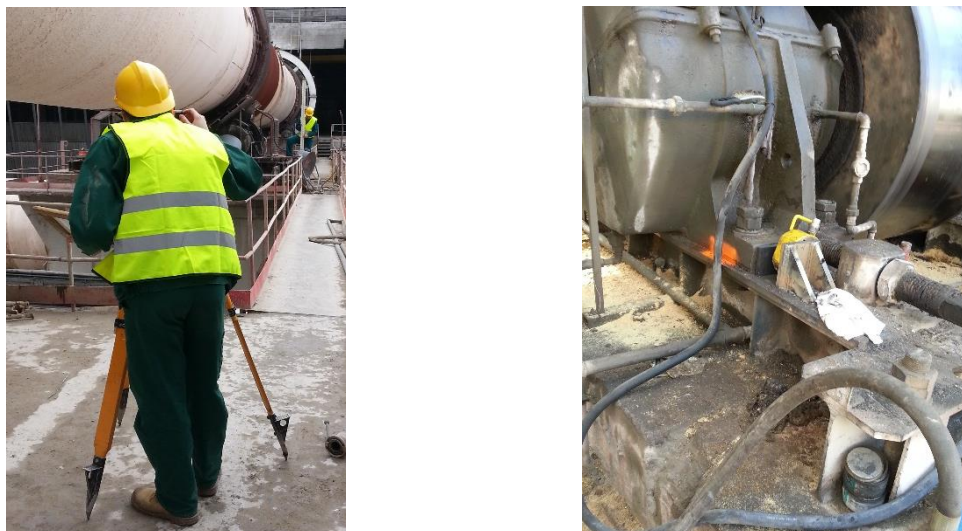


Figura 82 - Alinhamento do Forno da Linha 5

Ainda mais raro que a mudança de uma virola do forno, é o alinhamento deste. Foi então com extremo agrado que o aluno encarou a possibilidade de poder seguir de perto todo o processo que permite fazer a análise do estado de alinhamento em que o forno se encontra e a posterior correção e afinação do mesmo.

No fim, foi ainda elaborada pelo aluno uma sintética apresentação sobre o alinhamento realizado com base no relatório final da empresa que o executou e nas observações feitas localmente, apresentação esta que tinha como finalidade a elucidação das chefias envolvidas no processo quanto aos trabalhos realizados.

3. Trabalho Refratário no Arrefecedor 8 da Linha 5



Figura 83 – Intervenção no Altar do Arrefecedor de Clínquer da Linha 5



Figura 84 - Altar do Arrefecedor da Linha 5 depois da Intervenção

Um dos trabalhos acompanhados, e que ao contrário de outros aqui apresentados está relacionado com o equipamento estudado neste relatório, foi a intervenção de manutenção a nível de material refratário que se realizou no arrefecedor de clínquer, tendo sido renovado todo o altar, como pode ser observado na figura imediatamente acima exposta.

Como resultado do acompanhamento desta intervenção foi elaborado pelo aluno um relatório com os passos e características mais importantes do processo para ser mantida uma referência para um futuro trabalho do mesmo género. Uma das características retratadas no relatório foi o croqui do altar, presente no anexo XXIX, realizado aquando da sua manutenção.

4. Outros

Com o objetivo de tornar mais dinâmicas e recorrentes as inspeções locais aos vários equipamentos do processo de fabrico na fábrica Maceira-Liz levadas a cabo pelos preparadores, foi realizada pelo aluno uma revisão geral aos planos de inspeção em vigor, tendo também sido criados planos de inspeção para equipamentos que ainda não lhes tinham associado um.

Foi também elaborado um ficheiro Excel com o planeamento semanal de trabalho e que permitia calcular o número de horas necessárias para cada trabalho consoante o número de colaboradores destacados para a sua concretização.

Com o propósito de perceber se a composição de duas peças em aço fundido tinham as características que lhes eram exigidas, foram medidas as suas composições químicas através do mesmo método de análise não destrutiva utilizado para medir as composições das placas do arrefecedor de clínquer. Como resultado desta medição, foi ainda possibilitado ao aluno a visita à fundição onde eram produzidas as peças em questão.

Por fim, foram ainda preparadas duas listas de peças, uma com os elementos necessários para a substituição de algumas das placas do arrefecedor de clínquer da linha 6 para uma das paragens de linha realizadas ao longo do ano, a outra lista, continha todos os materiais gerados por fundição utilizados na CMP, lista esta que tinha como objetivo a negociação de novos preços perante os fornecedores.

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo primordial a otimização dos custos operacionais dos arrefecedores de clínquer de grelha presentes na fábrica Maceira-Liz mediante o desenvolvimento de possíveis soluções de melhoria para a resolução dos problemas apresentados no capítulo 5, tendo sempre em conta os aspetos funcionais e económicos do equipamento.

Relativamente ao primeiro problema identificado, associado às correias dos ventiladores de insuflação do arrefecedor de clínquer, pode concluir-se que, de uma forma geral os objetivos foram atingidos, uma vez que a proposta de alteração feita no ponto 6.1.2.4 representa uma solução mais económica que a utilizada, não só a nível dos custos de aquisição do material, mas também nos custos de armazém e na maior facilidade nas intervenções nesses ventiladores, dada a redução da variedade de materiais.

Pode ainda concluir-se que, no caso dos ventiladores 1 e 3, se deverá verificar um aumento, ainda que ligeiro, do caudal insuflado por estes ventiladores, resultado do aumento das relações de transmissão introduzidas. Também como resultado do incremento das relações de transmissão dos ventiladores 1 e 3, deverá notar-se, por parte destes, um consumo de energia ligeiramente inferior.

Até à data de fim do estágio não possível confirmar se realmente as medidas propostas, e neste caso particular postas em prática, deram frutos na vida de serviço das correias, uma vez que, apenas o ventilador 3 já foi alterado, tendo estado pouco tempo em serviço. Apesar do pouco tempo que esteve em serviço, olhando para os dados do seu consumo, é possível afirmar é que antes de se intervir no ventilador 3 o consumo médio do seu motor por metro cúbico de ar insuflado era de cerca de $5,31 \text{ kW/m}^3$, neste momento o mesmo equipamento apresenta um consumo médio de $4,72 \text{ kW/m}^3$.

Ainda no caso do ventilador 3, entre dois valores de rotação que se compararam para o mesmo valor de caudal de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, antes da intervenção a rotação do motor para o ventilador debitar este caudal era de 1405 rpm, agora, após a intervenção, para o mesmo débito de caudal do ventilador a rotação do motor é de 1343,7 rpm, conseguindo-se deste modo poupar também o motor, uma vez que ao trabalhar num regime de rotação mais baixo sofrerá um desgaste menor.

No que corresponde à análise feita à situação da anormal substituição de placas do arrefecedor de clínquer, foi possível concluir, através da análise feita, que a composição química das placas não terá sido uma das possíveis causas para este problema.

Já no estudo que foi feito para determinar a influência da afinação dos queimadores dos fornos, foi inconclusivo o papel que esta acção terá desempenhado no aumento da taxa de substituição de placas do arrefecedor, mas que, a verificar-se, teria sido apenas no arrefecedor de clínquer da linha 5.

O ficheiro Excel para fazer o controlo e monitorização das placas substituídas, apresentado no ponto 6.2.3, revelou-se simples de utilizar e de fácil adaptação às funções desempenhadas pelos preparadores.

Ainda no tema da substituição anormal de placas, as simulações levadas a cabo no *software* SOLIDWORKS, na tentativa de perceber se as alterações propostas para a placa lateral esquerda, com o objetivo de eliminar as causas que levam às suas falhas, revelaram alguns sinais positivos na perseguição da melhoria do produto, embora não tenham revelado as diferenças esperadas nos resultados.

Assim, como foi proposto no ponto 6.2.4.3 e antes de se alterar definitivamente a geometria em vigor da placa, terá todo o interesse a realização de uma análise experimental, aplicando a placa proposta neste trabalho para substituir a que se utiliza de momento em determinadas zonas. Posteriormente, e se se verificar que a longevidade em serviço da placa proposta compensa o custo unitário extra desta, poderá então pensar-se em adotar este desenho em substituição do atual.

Do balanço energético realizado ao arrefecedor foi possível concluir que, para as condições de processo que se verificaram no dia das medições efetuadas, a eficiência do arrefecedor de clínquer da linha 5 foi de 61%, o que se enquadra nos valores teóricos assumidos para um arrefecedor deste tipo, que se situam entre os 60 e os 70%.

Foi também possível perceber por meio deste balanço quais as variáveis que mais influenciam positivamente a eficiência do arrefecedor de clínquer, que neste caso são a recuperação de calor que se consegue fazer através do ar secundário e do ar de secagem do combustível.

Ao nível do processo de arrefecimento com injeção de água, embora a aproximação feita tenha sido algo simples, e tenham ficado a faltar outras análises, bem como a conjugação da injeção de água com a insuflação de ar e o balanço térmico final para comparação com o apresentado neste trabalho, é possível perceber através dos resultados obtidos que existe algum potencial para esta aplicação, e que o retorno do investimento feito será rapidamente recuperado.

Por fim, e como conclusão final, são de realçar todas as competências adquiridas através das experiências pessoais e profissionais vividas neste estágio, tendo algumas delas sido retratadas no capítulo 7, e que de alguma forma contribuíram para a progressão do aluno tanto a nível académico como laboral e pessoal.

8.2. Propostas de Desenvolvidos Futuros

De modo a dar continuidade ao trabalho desenvolvido aqui apresentado, são mencionadas, de seguida, algumas propostas para estudos de soluções de melhoria que se poderão revelar uma mais-valia no funcionamento futuro do arrefecedor de clínquer.

- Estudar a influência, na substituição das placas das grelhas do arrefecedor de clínquer, tendo a parte inicial da primeira grelha totalmente fixa, e o seu impacto no desempenho e eficiência do arrefecedor;
- Efetuar um estudo para uma possível mudança na composição química ou até mesmo a alteração do material utilizado;
- Fazer a análise de uma solução de revestimento parcial das placas do arrefecedor de clínquer, e estudar a sua influência no período de duração em serviço das mesmas;
- Elaborar estudos no sentido de perceber até que nível a utilização de outros desenhos de placas além do proposto poderão influenciar a taxa de substituição de placas corrente;
- Analisar a possível utilização de sensores de temperatura em várias zonas das grelhas para tentar perceber se existem situações em que as temperaturas são muito díspares e qual a sua influência na substituição de placas. Sendo também uma possibilidade a deteção da ocorrência de um fenómeno como o “*red river*” através desta aplicação;
- Por fim, o estudo mais aprofundado do sistema de injeção de água, fazendo a análise da sua interação com o ar insuflado pelo ventilador 5 e possivelmente também com o ar insuflado pelo ventilador 4. Após feito esse estudo, comparar fica apenas a faltar fazer a comparação entre o balanço térmico resultante de todo o sistema de arrefecimento de clínquer com a injeção de água e o balanço térmico apresentado neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AQUARIUS, “CASTING PRODUCTS”. Disponível em: <http://www.aquarius-germany.net/En/Files/Castings%20Eng%20neu.pdf> [Acedido em Novembro de 2015].
- [2] Bolas, Isabel M. B., “As novas tecnologias do cimento e a materialização do Corporativismo Português”, Lisboa.
- [3] D. Touil, H. F Belabed, C. Frances, S. Belaadi, “HEAT EXCHANGE MODELING OF A GRATE CLINKER COOLER AND ENTROPY PRODUCTION ANALYSIS”, paper published in International Journal of Heat and Technology, Vol. 23, Nº 1, pp 61-68 (2005).
- [4] DUNBELT, Dezembro de 2008, “POLIAS e CASQUILHOS TAPER LOCK”
- [5] E. Jessen e S. Hundeboel, “Cool It, avoid Snowmen! – Production Engineer APO cement compare and contrast the properties of previous generations of clinker cooler with the new ABC inlet cooler”, FLSmidth, Fevereiro 2007.
- [6] FAI-FTC, “The Special Steel Foundries”. Disponível em: http://www.forumtools.biz/fai-ftc/upload/1126_FAI_FTC_CATALOGO_ENG.pdf [Acedido a Novembro de 2015].
- [7] FLSmidth, “FLSmidth Cross-Bar™ Cooler” PDF, 2013.
- [8] FLSmidth, “F.L.SMIDTH – Grate Cooler CFG-Retrofit”,
- [9] FLSmidth Institute, “Operation and Optimization of Kiln Systems: Clinker Formation”, pp 307-437, August 2006.
- [10] FLSmidth Institute, “Operation and Optimization of Kiln Systems: Heat Balances”, pp 261-305, August 2006.
- [11] Gates Corporation, “INDUSTRIAL V-BELT DRIVE DESIGN MANUAL”.
- [12] Gonçalves, C. D., (2005) “Gestão da Manutenção de um Sistema de Cozedura na Indústria Cimenteira” Dissertação de Mestrado, Lisboa.
- [13] Henriques, L. M. A., (2010), “Intervenções de Manutenção na Linha de Fabrico de Cimento Branco: Optimização do Britador de Clínquer”, Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Coimbra.
- [14] Holderbank, “Cement Seminar: Process Technology – Heat Balances of Kilns and Coolers and Related Topics” PDF.
- [15] ISO 16911-1:2013(E): *Stationary source emissions – Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts- Part 1: Manual reference method*

- [16] J. I. Bhatti, F. M. Miller e S H. Kosmatka, “ Innovations in Portland Cement Manufacturing”, CD400, Portland Cement Association, Stokir, Illinois, U.S.A., pp. 477-498, 2004.
- [17] Secil [Online], “DIAGRAMA DO FABRICO DE CIMENTO”. Disponível em: http://www.secil.pt/pdf/proc_produtivo.pdf [Acedido a Julho de 2015].
- [18] Secil [Online], “PROCESSO DE FABRICO DE CIMENTO”. Disponível em: <http://www.secil.pt/pdf/Processo%20de%20Fabrico%20de%20Cimento.pdf> [Acedido a Dezembro de 2014].
- [19] Pombo, A. P., “ A “INDUSTRIA SOCIAL” DA FÁBRICA MACEIRA-LIZ: Política social e operariado na indústria do cimento”. Associação Portuguesa de Sociologia (1996). CELTA EDITORA.
- [20] Raziuddin Ahmad, Tasmeem Ahmad Khan, Vedika Agarwal, “Mass and Energy Balance in Grate Cooler of Cement Plant”, International Journal of Scientific Enginneering and Technology, Volume No.2, Issue No.7, pp: 631-637.
- [21] Shabana, Nael, (2013) “QATAR NATIONAL CEMENT COMPANY – Cement Rotary Kiln: Questions & Answers”.
- [22] Varela, Noel e Vieira, Fernando Sales, “Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas”.
- [23] Wegst, C. e Wegst, M., (2007), “SAHLSHLÜSSEL”. Editora SAHLSHLÜSSEL WEGST GMBH.

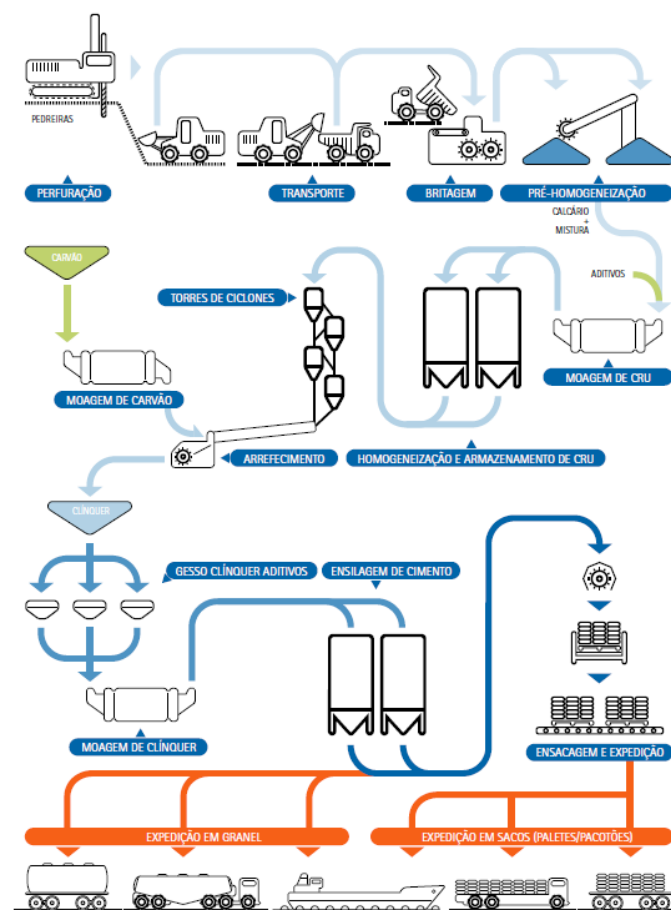
Webgrafia

- [24] http://pt.grundfos.com/Tabela_de_Pre%C3%A7os.html [Acedido em Junho de 2016]
- [25] <http://pt.slideshare.net/pradeepdeepi/red-river-in-clinker-cooler> [Acedido em Novembro de 2015]
- [26] <http://pt.slideshare.net/pradeepdeepi/snowman-formation-pradeep-kumar> [Acedido em Novembro de 2015]
- [27] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento> [Acedido em Julho de 2015]
- [28] https://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento_Portland [Acedido em Julho de 2015]
- [29] <http://www.cementkilns.co.uk/> [Acedido em Novembro de 2015]]
- [30] http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento [Acedido em Julho de 2015]
- [31] http://www.cimpor-portugal.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=1266&name=Centro-de-Producao-de-Loule [Acedido em Julho de 2015]

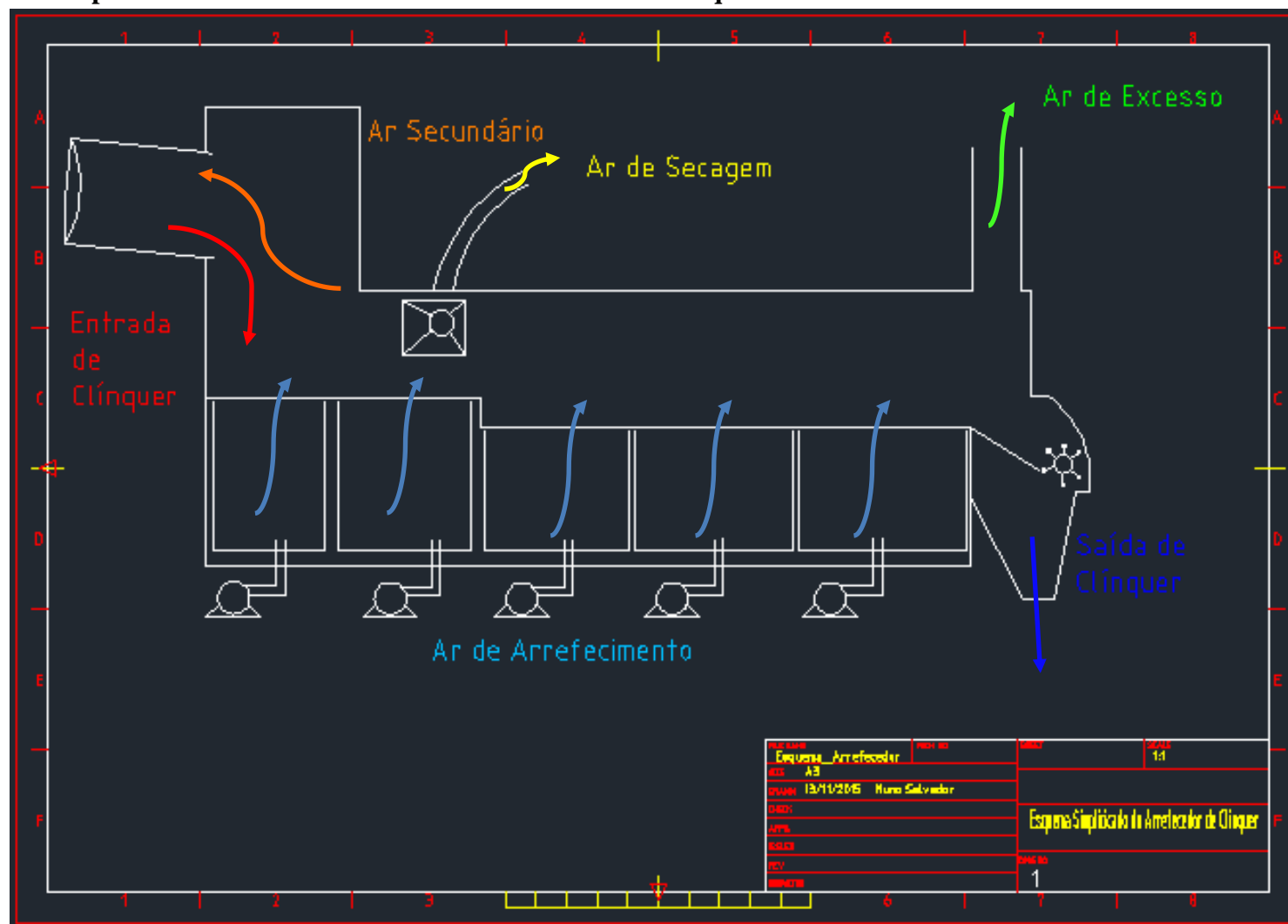
- [32] http://www.cimpor-portugal.pt/marcas_home.aspx?lang=pt&id_object=9 [Acedido em Julho de 2015]
- [33] <http://www.edp.pt/pt/Pages/homepage.aspx> [Acedido em Junho de 2016]
- [34] http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Perdas_de_carga_em_acessorios.pdf [Acedido em Maio de 2016]
- [35] <http://www.pintocruz.pt/tubagens-e-sistemas/pt/> [Acedido em Junho de 2016]
- [36] http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico_cimento [Acedido em Julho de 2015]:
- [37] http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc_fabrico [Acedido em Julho de 2015]:
- [38] http://www.secil.pt/pdf/rc/ra_po_1.pdf [Acedido em Julho de 2015]:
- [39] <http://www.semapa.pt/pt-pt/historia> [Acedido em Julho de 2015]
- [40] <http://www.spray.com/> [Acedido em Junho de 2016]
- [41] <https://www.thermbond.com> [Acedido em Dezembro de 2015]

ANEXOS

I. Esquema do Processo de Fabrico [17]



II. Esquema Simplificado do Funcionamento do Arrefecedor de Clínquer



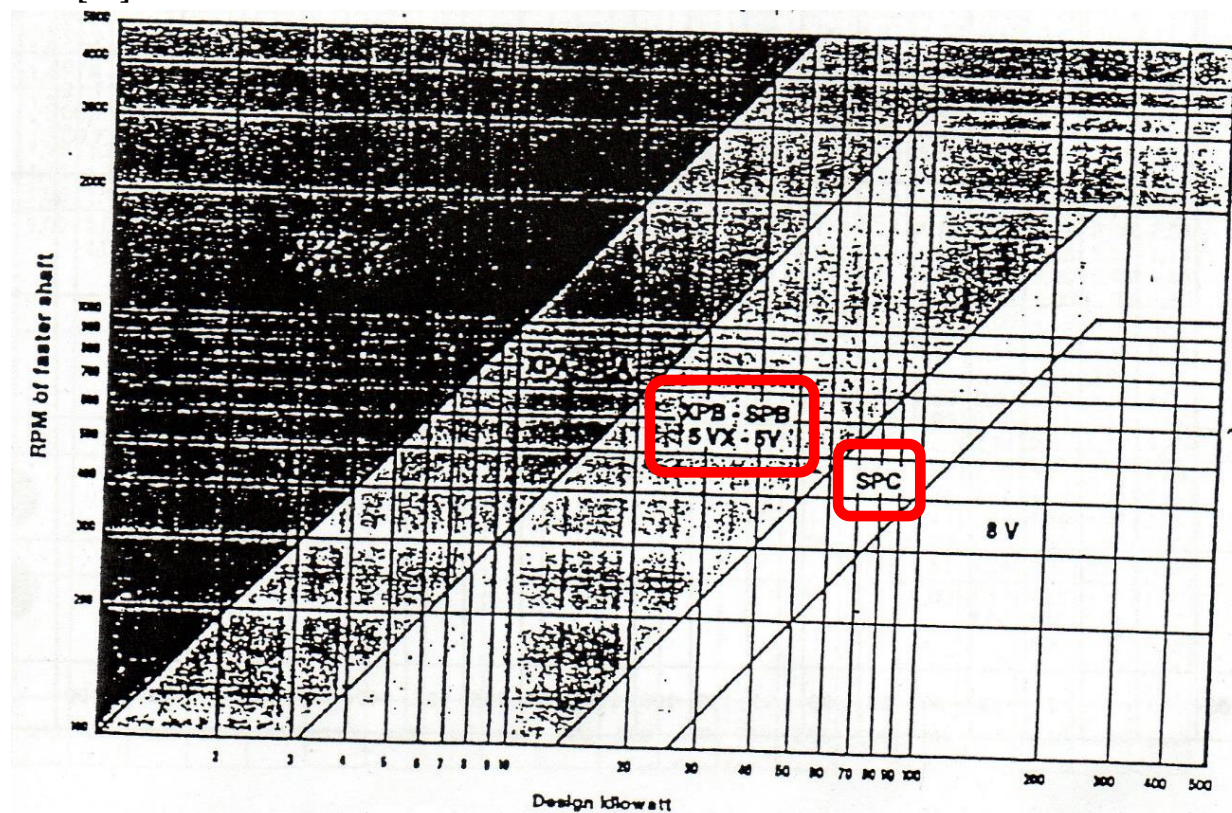
III. Potência de Projeto [11]

Table No. 1 - Service Factors

DriveN Machine	DriveR					
The machines listed below are representative examples only. Select the group listed below whose load characteristics most closely approximate those of the machine being considered.	AC Motors: Normal Torque, Squirrel Cage, Synchronous, Split Phase DC Motors: Shunt Wound Engines: Multiple Cylinder Internal Combustion. *			AC Motors: High Torque, High Slip, Repulsion Induction, Single Phase, Series Wound, Slip Ring. DC Motors: Series Wound, Compound Wound. Engines: Single Cylinder Internal Combustion. * Line shafts Clutches		
	Intermittent Service	Normal Service	Continuous Service	Intermittent Service	Normal Service	Continuous Service
	3-5 Hours Daily or Seasonal	8-10 Hours Daily	16-24 Hours Daily	3-5 Hours Daily or Seasonal	8-10 Hours Daily	16-24 Hours Daily
<i>horas de funcionamento por dia</i> Agitators for Liquids Blowers and Exhausters Centrifugal Pumps & Compressors Fans up to 10 Horsepower (7.5 kW) Light Duty Conveyors	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
Belt Conveyors For Sand, Grain, etc. Dough Mixers Fans Over 10 Horsepower (7.5 kW) Generators Line Shafts Laundry Machinery Machine Tools Punches-Presses-Shears Printing Machinery Positive Displacement Rotary Pumps Revolving and Vibrating Screens	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3	1,4
Brick Machinery Bucket Elevators Exciters Piston Compressors Conveyors (Drag-Pan-Screw) Hammer Mills Paper Mill Beaters Piston Pumps Positive Displacement Blowers Pulverizers Saw Mill and Woodworking Machinery Textile Machinery	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5
Crushers (Gyratory-Jaw-Roll) Mills (Ball-Rod-Tube) Holsts Rubber Calenders-Extruders-Mills	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8

* Apply indicated service factor to continuous engine rating. Deduct 0.2 (with a minimum service factor of 1.0) when applying to maximum intermittent rating. The use of a service factor of 2.0 is recommended for equipment subject to choking and to stalling.

IV. Secção da Correia [11]



V. Comprimento de Correias SPB [11]

Belt Ref. SPB	ISO Pitch length mm
SPB-1250	1250
SPB-1320	1320
SPB-1400	1400
SPB-1500	1500
SPB-1600	1600
SPB-1700	1700
SPB-1800	1800
SPB-1900	1900
SPB-2000	2000
SPB-2120	2120
SPB-2240	2240
SPB-2360	2360
SPB-2500	2500
SPB-2650	2650
SPB-2800	2800
SPB-3000	3000
SPB-3150	3150
SPB-3350	3350
SPB-3550	3550
SPB-3750	3750
SPB-4000	4000
SPB-4250	4250
SPB-4500	4500
SPB-4750	4750
SPB-5000	5000
SPB-5300	5300
SPB-5600	5600
SPB-6000	6000
SPB-6300	6300
SPB-6700	6700
SPB-7100	7100
SPB-7500	7500
SPB-8000	8000

VI. Fator h [11]

Table No. 6 - Center distance factor "h"

$\frac{D-d}{F}$	Factor h	$\frac{D-d}{F}$	Factor h	$\frac{D-d}{F}$	Factor h
0,00	0,00	0,21	0,11	0,40	0,22
0,02	0,01	0,23	0,12	0,41	0,23
0,04	0,02	0,25	0,13	0,43	0,24
0,06	0,03	0,27	0,14	0,44	0,25
0,08	0,04	0,29	0,15	0,46	0,26
0,10	0,05	0,30	0,16	0,47	0,27
0,12	0,06	0,32	0,17	0,48	0,28
0,14	0,07	0,34	0,18	0,50	0,29
0,16	0,08	0,35	0,19	0,51	0,30
0,18	0,09	0,37	0,20		
0,20	0,10	0,39	0,21		

VII. Fatores M e Y [11]

Table No. 12 - Factor M and factor Y

Individual V-Belt Cross Section	M	Y	PowerBand Cross Section	M
Z	0.005	0.9		
A	0.009	1.3	A	0.011
B	0.014	1.9	B	0.017
C	0.026	3.0	C	0.031
D	0.052	6.3	D	0.059
AX	0.008	1.3		
BX	0.013	1.9		
CX	0.023	3.0		
SPZ/3V	0.0066	1.5	9J/3V	0.008
SPA	0.012	2.0		
SPB/5V	0.017	2.6	15J/5V	0.021
SPC	0.032	4.1		
8V	0.046	6.0	25J/8V/8VK	0.053
XPZ/3VX	0.006	1.5	3VX	0.007
XPA	0.0104	2.0		
XPB/5VX	0.013	2.6	5VX	0.016

Note: For additional tensioning information on PowerBand, see page 17.

VIII. Tolerâncias de Pré-Tensão [11]

PITCH LENGTH	MINIMUM INSTALLATION ALLOWANCE, mm																MINIMUM TAKE-UP ALLOWANCE mm	
	V-BELT SECTION																	
	XPZ 3VX SPZ 3V	XPA SPA	XPB 5VX SPB 5V	SPC	8V 8VK	9J PB	15J PB	25J PB	Z	AX A	A PB	BX B	B PB	CX C	C PB	D	D PB	ALL SECTIONS
420-1199	15	20	-	-	-	30	-	-	15	20	30	25	35	40	50	-	-	25
1200-1999	20	25	25	-	-	35	55	-	20	20	30	30	40	40	50	50	65	35
2000-2749	20	25	25	35	40	35	55	85	20	25	35	30	40	40	50	50	65	40
2750-3499	20	25	25	35	40	35	55	85	-	25	35	30	40	40	50	50	75	45
3500-4499	20	25	25	35	40	35	55	85	-	25	35	30	40	50	60	55	75	55
4500-5499	-	25	25	35	-	-	55	90	-	25	35	40	50	50	60	60	80	65
5500-6499	-	-	35	40	45	-	60	90	-	25	35	40	50	50	60	60	80	85
6500-7999	-	-	35	40	45	-	60	90	-	-	-	40	50	50	60	65	85	95
8000-	-	-	35	45	50	-	60	100	-	-	-	-	50	50	60	65	85	110

IX. Fatores A para Correias SPB [11]

Basic Kilowatt per belt

5V-SPB-15J

RPM of faster Shaft	160	170	180	190	200	212	224	236	250	265	280	300	315	335	355	375	400
455	3.36	3.76	4.17	4.58	4.98	5.46	5.94	6.41	6.97	7.56	8.14	8.91	9.49	10.3	11.0	11.8	12.7
575	3.88	4.36	4.83	5.30	5.77	6.34	6.89	7.45	8.09	8.78	9.46	10.4	11.0	11.9	12.8	13.7	14.7
555	3.94	4.42	4.90	5.38	5.86	6.43	7.00	7.56	8.21	8.91	9.60	10.5	11.2	12.1	13.0	13.9	14.9
700	4.58	5.15	5.72	6.28	6.84	7.51	8.17	8.83	9.60	10.4	11.2	12.3	13.1	14.1	15.1	16.2	17.4
870	5.49	6.18	6.87	7.55	8.23	9.04	9.84	10.6	11.6	12.5	13.5	14.8	15.7	16.9	18.1	19.3	20.8
950	5.90	6.64	7.39	8.12	8.86	9.73	10.6	11.4	12.4	13.5	14.5	15.9	16.9	18.2	19.5	20.7	22.3
1150	6.92	7.81	8.69	9.56	10.4	11.5	12.5	13.5	14.6	15.8	17.0	18.6	19.7	21.2	22.7	24.1	25.7
1450	8.22	9.29	10.3	11.4	12.4	13.6	14.8	16.0	17.3	18.7	20.1	21.9	23.1	24.8	26.3	27.8	29.5
1750	9.43	10.7	11.9	13.1	14.2	15.6	16.9	18.2	19.7	21.2	22.7	24.6	25.9	27.5	29.0	30.4	32.0
2850	12.4	14.0	15.6	17.0	18.4	20.0	21.4	22.7	24.0	25.2							
100	0.84	0.94	1.03	1.13	1.22	1.33	1.44	1.55	1.68	1.82	1.95	2.14	2.27	2.45	2.63	2.81	3.03
200	1.56	1.74	1.92	2.09	2.27	2.49	2.70	2.91	3.15	3.41	3.68	4.02	4.28	4.62	4.96	5.30	5.72
300	2.22	2.48	2.74	3.00	3.26	3.57	3.88	4.19	4.54	4.92	5.30	5.80	6.18	6.67	7.17	7.66	8.27
400	2.84	3.19	3.53	3.87	4.20	4.61	5.01	5.41	5.87	6.37	6.86	7.51	8.00	8.64	9.28	9.92	10.7
500	3.44	3.85	4.28	4.70	5.11	5.61	6.10	6.59	7.16	7.76	8.36	9.16	9.75	10.5	11.3	12.1	13.0
600	4.02	4.52	5.01	5.50	5.99	6.57	7.15	7.73	8.40	9.11	9.81	10.7	11.4	12.4	13.3	14.2	15.3
700	4.58	5.15	5.72	6.28	6.84	7.51	8.17	8.83	9.60	10.4	11.2	12.3	13.1	14.1	15.1	16.2	17.4
800	5.12	5.76	6.40	7.04	7.67	8.42	9.16	9.90	10.8	11.7	12.6	13.8	14.6	15.8	16.9	18.1	19.4
900	5.64	6.35	7.06	7.77	8.47	9.30	10.1	10.9	11.9	12.9	13.9	15.2	16.1	17.4	18.6	19.9	21.3
1000	6.15	6.93	7.71	8.48	9.24	10.1	11.0	11.9	13.0	14.1	15.1	16.5	17.6	18.9	20.3	21.6	23.1
1100	6.64	7.49	8.33	9.16	9.99	11.0	11.9	12.9	14.0	15.2	16.3	17.8	18.9	20.4	21.8	23.2	24.8
1200	7.11	8.02	8.93	9.83	10.7	11.8	12.8	13.8	15.0	16.3	17.5	19.1	20.2	21.7	23.2	24.6	26.3
1300	7.57	8.54	9.51	10.5	11.4	12.5	13.6	14.7	16.0	17.3	18.6	20.2	21.4	23.0	24.5	26.0	27.7
1400	8.01	9.05	10.1	11.1	12.1	13.3	14.4	15.6	16.9	18.3	19.6	21.3	22.6	24.2	25.8	27.2	29.0
1500	8.43	9.53	10.6	11.7	12.7	14.0	15.2	16.4	17.8	19.2	20.6	22.4	23.6	25.3	26.8	28.3	30.0
1600	8.84	10.0	11.1	12.3	13.4	14.7	15.9	17.2	18.6	20.1	21.5	23.3	24.6	26.3	27.8	29.3	30.9
1700	9.24	10.4	11.6	12.8	13.9	15.3	16.6	17.9	19.4	20.9	22.3	24.2	25.5	27.1	28.7	30.1	31.7
1800	9.61	10.9	12.1	13.3	14.5	15.9	17.3	18.6	20.1	21.6	23.1	24.9	26.3	27.9	29.4	30.7	32.2
1900	9.97	11.3	12.6	13.8	15.0	16.5	17.9	19.2	20.7	22.3	23.8	25.6	26.9	28.5	30.0	31.2	32.5
2000	10.3	11.7	13.0	14.3	15.5	17.0	18.4	19.8	21.4	22.9	24.4	26.2	27.5	29.0	30.4	31.5	
2100	10.6	12.0	13.4	14.7	16.0	17.5	19.0	20.4	21.9	23.5	24.9	26.7	28.0	29.4	30.6		
2200	10.9	12.4	13.8	15.1	16.4	18.0	19.4	20.8	22.4	24.0	25.4	27.1	28.3	29.7			
2300	11.2	12.7	14.1	15.5	16.9	18.4	19.9	21.3	22.8	24.4	25.8	27.5	28.5				
2400	11.5	13.0	14.5	15.9	17.2	18.8	20.3	21.7	23.2	24.7	26.1	27.6	28.6				
2500	11.7	13.3	14.8	16.2	17.6	19.1	20.6	22.0	23.5	25.0	26.3	27.7					
2600	12.0	13.5	15.0	16.5	17.8	19.4	20.9	22.3	23.7	25.1	26.4						
2700	12.2	13.8	15.3	16.7	18.1	19.7	21.1	22.5	23.9	25.2	26.4						
2800	12.4	14.0	15.5	16.9	18.3	19.9	21.3	22.6	24.0	25.2							
2900	12.5	14.1	15.7	17.1	18.5	20.0	21.4	22.7	24.0								
3000	12.7	14.3	15.8	17.3	18.6	20.1	21.5	22.7	23.9								
3100	12.8	14.4	15.9	17.4	18.7	20.2	21.5	22.7									
3200	12.9	14.5	16.0	17.5	18.8	20.2	21.5	22.5									
3300	12.9	14.6	16.1	17.5	18.8	20.2	21.4										
3400	13.0	14.6	16.1	17.5	18.7	20.1	21.2										
3500	13.0	14.6	16.1	17.5	18.7	19.9											
3600	13.0	14.6	16.1	17.4	18.5	19.7											
3700	13.0	14.5	16.0	17.2	18.3												
3800	12.9	14.5	15.8	17.1	18.1												
3900	12.8	14.3	15.7	16.8													
4000	12.7	14.2	15.5	16.6													
4100	12.6	14.0	15.2														
4200	12.4	13.8	15.0														
4300	12.2	13.5															
4400	11.9	13.2															
4500	11.7																
4600	11.4																
4700	11.1																
4800																	
4900																	
5000																	

For speeds over 30 m/s we recommend that pulleys be dynamically balanced.

X. Fator C para Correias SPB [11]

Additional kW per belt for belt life.

	25 000 Hrs	12 000 Hrs	6 000 Hrs
	0	$\frac{d \times Rpm}{228\,728}$	$\frac{d \times Rpm}{117\,647}$

XI. Fator B para Correias SPB [11]

Additional kW per belt for speed ratio

RPM of faster Shaft	1.00 to 1.01	1.02 to 1.05	1.06 to 1.11	1.12 to 1.18	1.19 to 1.26	1.27 to 1.38	1.39 to 1.57	1.58 to 1.94	1.95 to 3.38	3.39 and Over
485	0.00	0.04	0.10	0.17	0.23	0.27	0.32	0.36	0.39	0.42
575	0.00	0.04	0.11	0.20	0.27	0.33	0.38	0.43	0.47	0.50
585	0.00	0.04	0.12	0.20	0.27	0.33	0.39	0.44	0.48	0.50
700	0.00	0.05	0.14	0.24	0.33	0.40	0.46	0.52	0.57	0.60
870	0.00	0.06	0.17	0.30	0.41	0.49	0.58	0.65	0.71	0.75
950	0.00	0.07	0.19	0.33	0.44	0.54	0.63	0.71	0.77	0.82
1150	0.00	0.08	0.23	0.40	0.54	0.66	0.77	0.87	0.94	1.00
1450	0.00	0.10	0.29	0.50	0.68	0.82	0.96	1.08	1.18	1.25
1750	0.00	0.13	0.34	0.60	0.82	0.99	1.16	1.31	1.42	1.51
2850	0.00	0.21	0.56	0.98	1.33	1.61	1.89	2.13	2.32	2.45
100	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09
200	0.00	0.01	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17
300	0.00	0.02	0.06	0.10	0.14	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26
400	0.00	0.03	0.08	0.14	0.19	0.23	0.27	0.30	0.33	0.34
500	0.00	0.04	0.10	0.17	0.23	0.28	0.33	0.37	0.41	0.43
600	0.00	0.04	0.12	0.21	0.28	0.34	0.40	0.45	0.49	0.52
700	0.00	0.05	0.14	0.24	0.33	0.40	0.46	0.52	0.57	0.60
800	0.00	0.06	0.16	0.27	0.37	0.45	0.53	0.60	0.65	0.69
900	0.00	0.07	0.18	0.31	0.42	0.51	0.60	0.67	0.73	0.78
1000	0.00	0.07	0.20	0.34	0.47	0.57	0.66	0.75	0.81	0.86
1100	0.00	0.08	0.22	0.38	0.51	0.62	0.73	0.82	0.89	0.95
1200	0.00	0.09	0.24	0.41	0.56	0.68	0.80	0.90	0.98	1.03
1300	0.00	0.09	0.26	0.45	0.61	0.74	0.86	0.97	1.06	1.12
1400	0.00	0.10	0.28	0.48	0.65	0.79	0.93	1.05	1.14	1.21
1500	0.00	0.11	0.30	0.51	0.70	0.85	0.99	1.12	1.22	1.29
1600	0.00	0.12	0.32	0.55	0.75	0.91	1.06	1.19	1.30	1.38
1700	0.00	0.12	0.33	0.58	0.79	0.96	1.13	1.27	1.38	1.46
1800	0.00	0.13	0.35	0.62	0.84	1.02	1.19	1.34	1.46	1.55
1900	0.00	0.14	0.37	0.65	0.89	1.08	1.25	1.42	1.54	1.64
2000	0.00	0.14	0.39	0.69	0.93	1.13	1.33	1.49	1.63	1.72
2100	0.00	0.15	0.41	0.72	0.98	1.19	1.39	1.57	1.71	1.81
2200	0.00	0.16	0.43	0.76	1.03	1.25	1.46	1.64	1.79	1.89
2300	0.00	0.17	0.45	0.79	1.07	1.30	1.53	1.72	1.87	1.98
2400	0.00	0.17	0.47	0.82	1.12	1.36	1.59	1.79	1.95	2.07
2500	0.00	0.18	0.49	0.86	1.17	1.42	1.66	1.87	2.03	2.15
2600	0.00	0.19	0.51	0.89	1.21	1.47	1.72	1.94	2.11	2.24
2700	0.00	0.20	0.53	0.93	1.26	1.53	1.79	2.02	2.20	2.33
2800	0.00	0.20	0.55	0.96	1.31	1.59	1.86	2.09	2.28	2.41
2900	0.00	0.21	0.57	1.00	1.36	1.64	1.92	2.16	2.36	2.50
3000	0.00	0.22	0.59	1.03	1.40	1.70	1.99	2.24	2.44	2.58
3100	0.00	0.22	0.61	1.06	1.45	1.76	2.06	2.31	2.52	2.67
3200	0.00	0.23	0.63	1.10	1.50	1.81	2.12	2.39	2.60	2.76
3300	0.00	0.24	0.65	1.13	1.54	1.87	2.19	2.46	2.68	2.84
3400	0.00	0.25	0.67	1.17	1.59	1.93	2.25	2.54	2.76	2.93
3500	0.00	0.25	0.69	1.20	1.64	1.98	2.32	2.61	2.85	3.01
3600	0.00	0.26	0.71	1.24	1.68	2.04	2.39	2.69	2.93	3.10
3700	0.00	0.27	0.73	1.27	1.73	2.10	2.45	2.76	3.01	3.19
3800	0.00	0.27	0.75	1.30	1.78	2.15	2.52	2.84	3.09	3.27
3900	0.00	0.28	0.77	1.34	1.82	2.21	2.59	2.91	3.17	3.36
4000	0.00	0.29	0.79	1.37	1.87	2.27	2.65	2.99	3.25	3.45
4100	0.00	0.30	0.81	1.41	1.92	2.32	2.72	3.06	3.33	3.53
4200	0.00	0.30	0.83	1.44	1.96	2.38	2.79	3.14	3.42	3.62
4300	0.00	0.31	0.85	1.48	2.01	2.43	2.85	3.21	3.50	3.70
4400	0.00	0.32	0.87	1.51	2.06	2.49	2.92	3.28	3.58	3.79
4500	0.00	0.33	0.89	1.54	2.10	2.55	2.98	3.36	3.66	3.88
4600	0.00	0.33	0.91	1.58	2.15	2.60	3.05	3.43	3.74	3.96
4700	0.00	0.34	0.93	1.61	2.20	2.66	3.12	3.51	3.82	4.05
4800	0.00	0.35	0.95	1.65	2.24	2.72	3.18	3.58	3.90	4.13
4900	0.00	0.35	0.97	1.68	2.29	2.77	3.25	3.66	3.98	4.22
5000	0.00	0.36	0.98	1.72	2.34	2.83	3.32	3.73	4.07	4.31

XII. Fator C_L para Correias SPB [11]

Arc of contact correction factor G ,
for V-V drives

$\frac{D-d}{A}$	Arc of contact on small sheave (degrees)	Factor G
0,00	180	1,00
0,10	174	0,99
0,20	169	0,97
0,30	163	0,96
0,40	157	0,94
0,50	151	0,93
0,60	145	0,91
0,70	139	0,89
0,80	133	0,87
0,90	127	0,85
1,00	120	0,82
1,10	113	0,80
1,20	106	0,77
1,30	99	0,73
1,40	91	0,70
1,50	83	0,65

XIII. Fator G para Correias SPB [11]

Belt length correction factor C_L

Belt Ref.	RMA Eff. length mm	Corr. factor C_L	Belt Ref.	ISO Pitch length mm	Corr. factor C_L
5V- 500	1270	0.85	SPB-1250	1250	0.85
5V- 530	1345	0.86	SPB-1320	1320	0.86
5V- 560	1420	0.87	SPB-1400	1400	0.87
5V- 600	1525	0.88	SPB-1500	1500	0.88
5V- 630	1600	0.89	SPB-1600	1600	0.89
5V- 670	1700	0.90	SPB-1700	1700	0.90
5V- 710	1805	0.91	SPB-1800	1800	0.91
5V- 750	1905	0.92	SPB-1900	1900	0.92
5V- 800	2030	0.93	SPB-2000	2000	0.93
5V- 850	2160	0.94	SPB-2120	2120	0.94
5V- 900	2285	0.95	SPB-2240	2240	0.94
5V- 950	2415	0.96	SPB-2360	2360	0.95
5V-1000	2540	0.97	SPB-2500	2500	0.96
5V-1060	2690	0.97	SPB-2650	2650	0.97
5V-1120	2845	0.98	SPB-2800	2800	0.98
5V-1180	2995	0.99	SPB-3000	3000	0.99
5V-1250	3175	1.00	SPB-3150	3150	1.00
5V-1320	3355	1.01	SPB-3350	3350	1.01
5V-1400	3555	1.02	SPB-3550	3550	1.02
5V-1500	3810	1.03	SPB-3750	3750	1.03
5V-1600	4065	1.04	SPB-4000	4000	1.04
5V-1700	4320	1.05	SPB-4250	4250	1.05
5V-1800	4570	1.06	SPB-4500	4500	1.06
5V-1900	4825	1.07	SPB-4750	4750	1.07
5V-2000	5080	1.08	SPB-5000	5000	1.08
5V-2120	5385	1.09	SPB-5300	5300	1.08
5V-2240	5690	1.10	SPB-5600	5600	1.09
5V-2360	5995	1.10	SPB-6000	6000	1.10
5V-2500	6350	1.11	SPB-6300	6300	1.11
5V-2650	6730	1.12	SPB-6700	6700	1.12
5V-2800	7110	1.13	SPB-7100	7100	1.13
5V-3000	7620	1.14	SPB-7500	7500	1.14
5V-3150	8000	1.15	SPB-8000	8000	1.15
5V-3550	9015	1.17			

The sizes printed in colour are available as 15J PowerBand.

XIV. Comprimento de Correias SPC [11]

Belt Ref. SPC	ISO Pitch length mm
SPC-2000	2000
SPC-2120	2120
SPC-2240	2240
SPC-2360	2360
SPC-2500	2500
SPC-2650	2650
SPC-2800	2800
SPC-3000	3000
SPC-3150	3150
SPC-3350	3350
SPC-3550	3550
SPC-3750	3750
SPC-4000	4000
SPC-4250	4250
SPC-4500	4500
SPC-4750	4750
SPC-5000	5000
SPC-5300	5300
SPC-5600	5600
SPC-6000	6000
SPC-6300	6300
SPC-6700	6700
SPC-7100	7100
SPC-7500	7500
SPC-8000	8000
SPC-8500	8500
SPC-9000	9000

XV. Fatores A para Correias SPC [11]

Basic Kilowatt per belt

SPC

RPM of faster Shaft	250	265	280	300	315	335	355	375	400	425	450	475	500	530	560	600	630
435	8.75	9.74	10.7	12.0	13.0	14.3	15.5	16.8	18.4	19.9	21.5	23.0	24.5	26.3	28.1	30.4	32.1
455	9.60	10.7	11.8	13.2	14.3	15.7	17.1	18.5	20.2	21.9	23.6	25.2	26.9	28.8	30.8	33.3	35.2
575	11.1	12.3	13.6	15.3	16.5	18.1	19.7	21.3	23.3	25.3	27.2	29.1	31.0	33.2	35.4	38.3	40.4
585	11.2	12.5	13.8	15.5	16.7	18.4	20.0	21.7	23.7	25.6	27.6	29.5	31.5	33.7	35.9	38.8	40.9
700	13.0	14.5	16.0	18.0	19.4	21.4	23.3	25.1	27.4	29.7	32.0	34.2	36.3	38.9	41.3	44.5	46.8
725	13.4	15.0	16.5	18.5	20.0	22.0	23.9	25.9	28.2	30.6	32.9	35.1	37.3	39.9	42.4	45.7	48.0
870	15.5	17.3	19.1	21.4	23.2	25.4	27.7	29.9	32.6	35.2	37.8	40.3	42.7	45.5	48.2	51.6	54.0
950	16.6	18.5	20.4	22.9	24.8	27.2	29.6	31.9	34.8	37.5	40.2	42.8	45.3	48.2	50.9	54.3	56.7
1160	19.3	21.5	23.7	26.6	28.7	31.4	34.1	36.7	39.8	42.8	45.6	48.3	50.9	53.7	56.3	59.3	61.3
1450	22.4	24.9	27.5	30.7	33.1	36.1	38.9	41.7	44.9	47.8	50.5	52.9	55.0				
50	1.80	1.43	1.56	1.74	1.87	2.04	2.21	2.39	2.60	2.81	3.03	3.24	3.45	3.70	3.95	4.29	4.54
100	2.42	2.67	2.92	3.25	3.50	3.83	4.17	4.49	4.90	5.31	5.72	6.12	6.52	7.01	7.49	8.12	8.60
150	3.46	3.83	4.20	4.68	5.05	5.53	6.01	6.49	7.09	7.68	8.28	8.86	9.45	10.2	10.8	11.8	12.5
200	4.46	4.94	5.42	6.06	6.53	7.16	7.79	8.42	9.20	9.97	10.7	11.5	12.3	13.2	14.1	15.3	16.2
250	5.42	6.01	6.60	7.39	7.97	8.75	9.52	10.3	11.2	12.2	13.1	14.1	15.0	16.1	17.2	18.7	19.8
300	6.36	7.06	7.75	8.68	9.37	10.3	11.2	12.1	13.2	14.4	15.5	16.6	17.7	19.0	20.3	22.0	23.3
350	7.26	8.07	8.87	9.94	10.7	11.8	12.8	13.9	15.2	16.5	17.7	19.0	20.3	21.8	23.2	25.2	26.7
400	8.15	9.06	9.96	11.2	12.1	13.3	14.4	15.6	17.1	18.5	19.9	21.4	22.8	24.4	26.1	28.3	29.9
450	9.01	10.0	11.0	12.4	13.4	14.7	16.0	17.3	18.9	20.5	22.1	23.7	25.2	27.1	28.9	31.3	33.1
500	9.85	11.0	12.1	13.5	14.6	16.1	17.5	18.9	20.7	22.5	24.2	25.9	27.6	29.6	31.6	34.2	36.1
550	10.7	11.9	13.1	14.7	15.9	17.4	19.0	20.6	22.5	24.4	26.2	28.1	29.9	32.0	34.2	36.9	39.0
600	11.5	12.8	14.1	15.8	17.1	18.8	20.5	22.1	24.2	26.2	28.2	30.2	32.1	34.4	36.7	39.6	41.7
650	12.3	13.7	15.1	16.9	18.3	20.1	21.9	23.6	25.8	28.0	30.1	32.2	34.3	36.7	39.0	42.1	44.4
700	13.0	14.5	16.0	18.0	19.4	21.4	23.3	25.1	27.4	29.7	32.0	34.2	36.3	38.9	41.3	44.5	46.8
750	13.8	15.4	16.9	19.0	20.6	22.6	24.6	26.6	29.0	31.4	33.8	36.0	38.3	40.9	43.5	46.8	49.2
800	14.5	16.2	17.9	20.0	21.7	23.8	25.9	28.0	30.5	33.0	35.5	37.9	40.2	42.9	45.5	48.9	51.3
850	15.2	17.0	18.7	21.0	22.7	25.0	27.2	29.3	32.0	34.6	37.1	39.6	42.0	44.8	47.5	50.9	53.3
900	15.9	17.8	19.6	22.0	23.8	26.1	28.4	30.7	33.4	36.1	38.7	41.2	43.7	46.5	49.3	52.7	55.1
950	16.6	18.5	20.4	22.9	24.8	27.2	29.6	31.9	34.8	37.5	40.2	42.8	45.3	48.2	50.9	54.3	56.7
1000	17.3	19.3	21.3	23.9	25.8	28.3	30.7	33.1	36.1	38.9	41.6	44.3	46.8	49.7	52.4	55.8	58.1
1050	17.9	20.0	22.0	24.7	26.7	29.3	31.8	34.3	37.3	40.2	43.0	45.6	48.2	51.1	53.8	57.1	59.4
1100	18.5	20.7	22.8	25.6	27.6	30.3	32.9	35.4	38.5	41.4	44.2	46.9	49.5	52.3	55.0	58.2	60.4
1150	19.1	21.4	23.6	26.4	28.5	31.3	33.9	36.5	39.6	42.6	45.4	48.1	50.6	53.5	56.1	59.1	61.1
1200	19.7	22.0	24.3	27.2	29.4	32.2	34.9	37.5	40.6	43.6	46.5	49.2	51.7	54.5	57.0	59.9	61.7
1250	20.3	22.7	25.0	28.0	30.2	33.0	35.8	38.5	41.6	44.6	47.5	50.1	52.6	55.3	57.7	60.4	
1300	20.8	23.3	25.6	28.7	31.0	33.9	36.7	39.3	42.5	45.6	48.4	51.0	53.4	56.0	58.2		
1350	21.4	23.8	26.3	29.4	31.7	34.6	37.5	40.2	43.4	46.4	49.2	51.7	54.1	56.5	58.6		
1400	21.9	24.4	26.9	30.1	32.4	35.4	38.2	41.0	44.2	47.1	49.9	52.4	54.6	56.9			
1450	22.4	24.9	27.5	30.7	33.1	36.1	38.9	41.7	44.9	47.8	50.5	52.9	55.0				
1500	22.8	25.5	28.0	31.3	33.7	36.7	39.6	42.3	45.5	48.4	51.0	53.2	55.2				
1550	23.3	25.9	28.5	31.9	34.3	37.3	40.2	42.9	46.0	48.8	51.3	53.5					
1600	23.7	26.4	29.0	32.4	34.8	37.9	40.7	43.4	46.5	49.2	51.6	53.6					
1650	24.1	26.8	29.5	32.9	35.3	38.4	41.2	43.9	46.9	49.5	51.7						
1700	24.4	27.2	29.9	33.3	35.8	38.8	41.6	44.2	47.2	49.7							
1750	24.8	27.6	30.3	33.7	36.2	39.2	42.0	44.5	47.4	49.7							
1800	25.1	28.0	30.7	34.1	36.5	39.5	42.3	44.8	47.5								
1850	25.4	28.3	31.0	34.4	36.8	39.8	42.5	44.9	47.5								
1900	25.7	28.6	31.3	34.7	37.1	40.0	42.7	45.0	47.4								
1950	25.9	28.8	31.6	35.0	37.3	40.2	42.8	45.0									
2000	26.2	29.1	31.8	35.2	37.5	40.3	42.8	44.9									
2050	26.3	29.2	32.0	35.3	37.6	40.4	42.7										
2100	26.5	29.4	32.1	35.4	37.7	40.3	42.6										
2150	26.7	29.5	32.2	35.5	37.7	40.3	42.4										
2200	26.8	29.6	32.3	35.5	37.7	40.1											
2250	26.8	29.7	32.3	35.5	37.6	39.9											
2300	26.9	29.7	32.3	35.4	37.4												
2350	26.9	29.7	32.3	35.3	37.2												
2400	26.9	29.7	32.2	35.1	36.9												
2450	26.9	29.6	32.1	34.9													
2500	26.8	29.5	31.9	34.6													

- For speeds over 30 m/s we recommend that pulleys be dynamically balanced.

XVI. Fator C para Correias SPC [11]

Additional kW per belt for belt life.

	25 000 Hrs	12 000 Hrs	6 000 Hrs
	0	$\frac{d \times Rpm}{128\,090}$	$\frac{d \times Rpm}{65\,876}$

XVII. Fator B para Correias SPC [11]

Additional kW per belt for speed ratio											
RPM of faster Shaft	1.00 to 1.01	1.02 to 1.05	1.06 to 1.11	1.12 to 1.18	1.19 to 1.26	1.27 to 1.38	1.39 to 1.57	1.58 to 1.94	1.95 to 3.38	3.39 to End	
435	0.00	0.09	0.23	0.41	0.55	0.67	0.78	0.88	0.96	1.02	
455	0.00	0.10	0.25	0.45	0.62	0.75	0.87	0.98	1.07	1.13	
575	0.00	0.11	0.31	0.54	0.73	0.88	1.04	1.17	1.27	1.34	
585	0.00	0.11	0.31	0.55	0.74	0.90	1.05	1.19	1.29	1.37	
700	0.00	0.14	0.37	0.65	0.89	1.08	1.26	1.42	1.55	1.64	
725	0.00	0.14	0.39	0.68	0.92	1.11	1.31	1.47	1.60	1.70	
870	0.00	0.17	0.47	0.81	1.10	1.34	1.57	1.76	1.92	2.03	
950	0.00	0.19	0.51	0.89	1.21	1.46	1.71	1.93	2.10	2.22	
1160	0.00	0.23	0.62	1.08	1.47	1.78	2.09	2.35	2.56	2.71	
1450	0.00	0.28	0.78	1.35	1.84	2.23	2.61	2.94	3.20	3.39	
50	0.00	0.01	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	
100	0.00	0.02	0.05	0.09	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22	0.23	
150	0.00	0.03	0.08	0.14	0.19	0.23	0.27	0.30	0.33	0.35	
200	0.00	0.04	0.11	0.19	0.25	0.31	0.36	0.41	0.44	0.47	
250	0.00	0.05	0.13	0.23	0.32	0.38	0.45	0.51	0.55	0.58	
300	0.00	0.06	0.16	0.28	0.38	0.46	0.54	0.61	0.66	0.70	
350	0.00	0.07	0.19	0.33	0.44	0.54	0.63	0.71	0.77	0.82	
400	0.00	0.08	0.21	0.37	0.51	0.62	0.72	0.81	0.88	0.94	
450	0.00	0.09	0.24	0.42	0.57	0.69	0.81	0.91	0.99	1.05	
500	0.00	0.10	0.27	0.47	0.63	0.77	0.90	1.01	1.10	1.17	
550	0.00	0.11	0.29	0.51	0.70	0.85	0.99	1.11	1.21	1.29	
600	0.00	0.12	0.32	0.56	0.76	0.92	1.08	1.22	1.32	1.40	
650	0.00	0.13	0.35	0.61	0.82	1.00	1.17	1.32	1.44	1.52	
700	0.00	0.14	0.37	0.65	0.89	1.08	1.26	1.42	1.55	1.64	
750	0.00	0.15	0.40	0.70	0.95	1.15	1.35	1.52	1.66	1.75	
800	0.00	0.16	0.43	0.75	1.01	1.23	1.44	1.62	1.77	1.87	
850	0.00	0.17	0.45	0.79	1.08	1.31	1.53	1.72	1.88	1.99	
900	0.00	0.18	0.48	0.84	1.14	1.38	1.62	1.82	1.99	2.10	
950	0.00	0.19	0.51	0.89	1.21	1.46	1.71	1.93	2.10	2.22	
1000	0.00	0.20	0.53	0.93	1.27	1.54	1.80	2.03	2.21	2.34	
1050	0.00	0.21	0.56	0.98	1.33	1.61	1.89	2.13	2.32	2.46	
1100	0.00	0.22	0.59	1.03	1.40	1.69	1.98	2.23	2.43	2.57	
1150	0.00	0.23	0.61	1.07	1.46	1.77	2.07	2.33	2.54	2.69	
1200	0.00	0.24	0.64	1.12	1.52	1.85	2.16	2.43	2.65	2.81	
1250	0.00	0.25	0.67	1.17	1.59	1.92	2.25	2.53	2.76	2.92	
1300	0.00	0.26	0.70	1.21	1.65	2.00	2.34	2.63	2.87	3.04	
1350	0.00	0.26	0.72	1.26	1.71	2.08	2.43	2.74	2.98	3.16	
1400	0.00	0.27	0.75	1.30	1.78	2.15	2.52	2.84	3.09	3.27	
1450	0.00	0.28	0.78	1.35	1.84	2.23	2.61	2.94	3.20	3.39	
1500	0.00	0.29	0.80	1.40	1.90	2.31	2.70	3.04	3.31	3.51	
1550	0.00	0.30	0.83	1.44	1.97	2.38	2.79	3.14	3.42	3.62	
1600	0.00	0.31	0.86	1.49	2.03	2.45	2.88	3.24	3.53	3.74	
1650	0.00	0.32	0.88	1.54	2.09	2.54	2.97	3.34	3.64	3.86	
1700	0.00	0.33	0.91	1.58	2.16	2.61	3.06	3.45	3.75	3.98	
1750	0.00	0.34	0.94	1.63	2.22	2.69	3.15	3.55	3.86	4.09	
1800	0.00	0.35	0.96	1.68	2.28	2.77	3.24	3.65	3.97	4.21	
1850	0.00	0.36	0.99	1.72	2.35	2.84	3.33	3.75	4.08	4.33	
1900	0.00	0.37	1.02	1.77	2.41	2.92	3.42	3.85	4.20	4.44	
1950	0.00	0.38	1.04	1.82	2.47	3.00	3.51	3.95	4.31	4.56	
2000	0.00	0.39	1.07	1.86	2.54	3.08	3.60	4.05	4.42	4.68	
2050	0.00	0.40	1.10	1.91	2.60	3.15	3.69	4.15	4.53	4.79	
2100	0.00	0.41	1.12	1.96	2.66	3.23	3.78	4.26	4.64	4.91	
2150	0.00	0.41	1.15	2.00	2.73	3.31	3.87	4.36	4.75	5.03	
2200	0.00	0.43	1.18	2.05	2.79	3.38	3.96	4.46	4.86	5.15	
2250	0.00	0.44	1.20	2.10	2.85	3.46	4.05	4.56	4.97	5.26	
2300	0.00	0.45	1.23	2.14	2.92	3.54	4.14	4.66	5.08	5.38	
2350	0.00	0.46	1.26	2.19	2.98	3.61	4.23	4.76	5.19	5.50	
2400	0.00	0.47	1.28	2.24	3.04	3.69	4.32	4.86	5.30	5.61	
2450	0.00	0.48	1.31	2.28	3.11	3.77	4.41	4.97	5.41	5.73	
2500	0.00	0.49	1.34	2.33	3.17	3.84	4.50	5.07	5.52	5.85	

XVIII. Fator C_L para Correias SPC [11]

Arc of contact correction factor G
for V-V drives

$\frac{D - d}{A}$	Arc of contact on small sheave (degrees).	Factor G
0,00	180	1,00
0,10	174	0,99
0,20	169	0,97
0,30	163	0,96
0,40	157	0,94
0,50	151	0,93
0,60	145	0,91
0,70	139	0,89
0,80	133	0,87
0,90	127	0,85
1,00	120	0,82
1,10	113	0,80
1,20	106	0,77
1,30	99	0,73
1,40	91	0,70
1,50	83	0,65

XIX. Fator G para Correias SPC [11]

Belt length correction factor C_L .

Belt Ref.	ISO Pitch length mm	Corr. factor C_L	
SPC 2000	2000	0.86	
SPC 2120	2120	0.87	
SPC 2240	2240	0.88	
SPC 2360	2360	0.89	
SPC 2500	2500	0.90	
SPC 2650	2650	0.90	
SPC 2800	2800	0.91	
SPC 3000	3000	0.92	
SPC 3150	3150	0.93	
SPC 3350	3350	0.94	
SPC 3550	3550	0.95	
SPC 3750	3750	0.96	
SPC 4000	4000	0.97	
SPC 4250	4250	0.98	
SPC 4500	4500	0.98	
SPC 4750	4750	0.99	
SPC 5000	5000	1.00	
SPC 5300	5300	1.01	
SPC 5600	5600	1.02	
SPC 6000	6000	1.03	
SPC 6300	6300	1.03	
SPC 6700	6700	1.04	
SPC 7100	7100	1.05	
SPC 7500	7500	1.06	
SPC 8000	8000	1.07	
SPC 8500	8500	1.08	
SPC 9000	9000	1.09	

XX. Diâmetros Primitivos Recomendados para Polias – De acordo com a Norma ISO R459 e a Norma DIN 2211 [11]

200	212	224	236	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	PROVINCIAL POLY-BELT Construction
X		X		X	X	X	X	X	X	X		X		X							SPZ/3V
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X					SPA
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	SPB/5V
				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	SPC
						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8V
									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8VK
X		X		X	X	X	X	X	X	X		X		X							XPZ/3VX
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X					XPA
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		XPB/5VX
X		X		X																	Z
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					A
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					B
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			C
						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	D
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								AX
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					BX
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			CX
200	212	224	236	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	

XXI. Tabela para Confirmação da Composição Química das Placas das Grelhas do Arrefecedor de Clínquer




Confirmação de ligas das placas para o arrefecedor de clínquer

Data	Nº de encomenda	Fornecedor	Responsável
18-12-2014	-----	-----	-----

Código	Liga	Composição [%peso] - Norma	Amostra	Composição da amostra [%peso]	Conforme? (S/N)
28847	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤1.5; P≤0.04; S≤0.03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0.5	1	Mo=0.24; Ni=3.36; Mn=0.62; Cr=24.36	~S
28851	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤1.5; P≤0.04; S≤0.03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0.5	1	Mo= 0.14; Ni=4.65; Mn=0.72; Cr=25.26	S
28853	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤1.5; P≤0.04; S≤0.03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0.5			
28765	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤1.5; P≤0.04; S≤0.03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0.5	1	Mo= 0.14; Ni=4.9; Mn=0.79; Cr=23.43	~S
28900	GX40 CrNiSi 22-10 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤2; P≤0.04; S≤0.03; 21<Cr<23; 9<Ni<11; Mo≤0.5	1	Mo= 0.27; Ni=11.37; Mn=0.94; Cr=21.47	S
28901	GX40 CrNiSi 22-10 DIN	0.3<C<0.5; 1<Si<2.5; Mn≤2; P≤0.04; S≤0.03; 21<Cr<23; 9<Ni<11; Mo≤0.5	1	Mo= 0.17; Ni=10.05; Mn=1.02; Cr=24.19	S

*Dados das ligas retirados do STAHL-SCHLÜSSEL, edição de 2007

XXII. Folha de Inspeção Local do Ficheiro Excel Proposto

	MTFM – Engenharia de Fiabilidade MACEIRA		Data:
	Controlo do gasto de placas do arrefecedor 8		Linha 5
	Executante:	Responsável MTFM:	

← Grelha 2

← Material ←

Caída do forno

Grelha 1																
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
F17	F16	F15	F14	F13	F12	F11	H12	G12	H11	G11						
D1	B117	B116	B115	B114	B113	B112	B111	B110	B109	B108	B107					
D2	C117	C116	C115	C114	C113	C112	C111	M20	M19	M18	M17	M16	M15	M14		
D3	C217	C216	C215	C214	C213	C212	C211	M30	M29	M28	M27	M26	M25	M24	M23	M22
D4	C317	C316	C315	C314	C313	C312	C311	M40	M39	M38	M37	M36	M35	M34	M33	M32
D5	C417	C416	C415	C414	C413	C412	C411	M50	M49	M48	M47	M46	M45	M44	M43	M42
D6	C517	C516	C515	C514	C513	C512	C511	M60	M59	M58	M57	M56	M55	M54		
D7	A117	A116	A115	A114	A113	A112	A111	A110	A109	A108	A107					
E17	E16	E15	E14	E13	E12	E11	H22	G22	H21	G21						
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Grelha 1

Caída para o Britador

← Material ←

Grelha 1 →

Grelha 2																															
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
F216	F215	F214	F213	F212	F211	F210	F209	F208	F207	F206	F205	F204	F203	F202	F201																
B232	B231	B230	B229	B228	B227	B226	B225	B224	B223	B222	B221	B220	B219	B218	B217	B216	B215	B214	B213	B212	B211	B210	B209	B208	B207	B206	B205	B204	B203	B202	B201
C632	C631	C630	C629	C628	C627	C626	C625	C624	C623	C622	C621	C620	C619	C618	C617	C616	C615	C614	C613	C612	C611	C610	C609	C608	C607	C606	C605	C604	C603	C602	C601
C732	C731	C730	C729	C728	C727	C726	C725	C724	C723	C722	C721	C720	C719	C718	C717	C716	C715	C714	C713	C712	C711	C710	C709	C708	C707	C706	C705	C704	C703	C702	C701
C832	C831	C830	C829	C828	C827	C826	C825	C824	C823	C822	C821	C820	C819	C818	C817	C816	C815	C814	C813	C812	C811	C810	C809	C808	C807	C806	C805	C804	C803	C802	C801
C932	C931	C930	C929	C928	C927	C926	C925	C924	C923	C922	C921	C920	C919	C918	C917	C916	C915	C914	C913	C912	C911	C910	C909	C908	C907	C906	C905	C904	C903	C902	C901
C1032	C1031	C1030	C1029	C1028	C1027	C1026	C1025	C1024	C1023	C1022	C1021	C1020	C1019	C1018	C1017	C1016	C1015	C1014	C1013	C1012	C1011	C1010	C1009	C1008	C1007	C1006	C1005	C1004	C1003	C1002	C1001
A232	A231	A230	A229	A228	A227	A226	A225	A224	A223	A222	A221	A220	A219	A218	A217	A216	A215	A214	A213	A212	A211	A210	A209	A208	A207	A206	A205	A204	A203	A202	A201
E216	E215	E214	E213	E212	E211	E210	E209	E208	E207	E206	E205	E204	E203	E202	E201																
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Grelha 2

Notas:

XXIII. Introdução de Dados do Ficheiro Excel Proposto

[illegible]

Grelha 2			Grelha 1
Un. Placa	Placa	Data	Observações
1	A203	04/08/2015	
1	A205	04/08/2015	
1	A206	04/08/2015	
1	A207	04/08/2015	
1	A208	04/08/2015	
1	A213	04/08/2015	
1	A215	04/08/2015	
1	A217	04/08/2015	
1	A224	04/08/2015	
1	A225	04/08/2015	
1			
1			

XXIV. Separador “Consulta_gasto_placas” do Arrefecedor 8 do Ficheiro Excel Proposto



Grelha 1

Grelha 2

Códigos das placas do esquema das placas do arrefecedor:

- Placas A código 28853
- Placas B código 28851
- Placas C código 28847
- Placas D código 28934
- Placas E código 28901
- Placas F código 28900
- Placas G código 28891
- Placas H código 28889
- Placas M código 28765

[illegible]

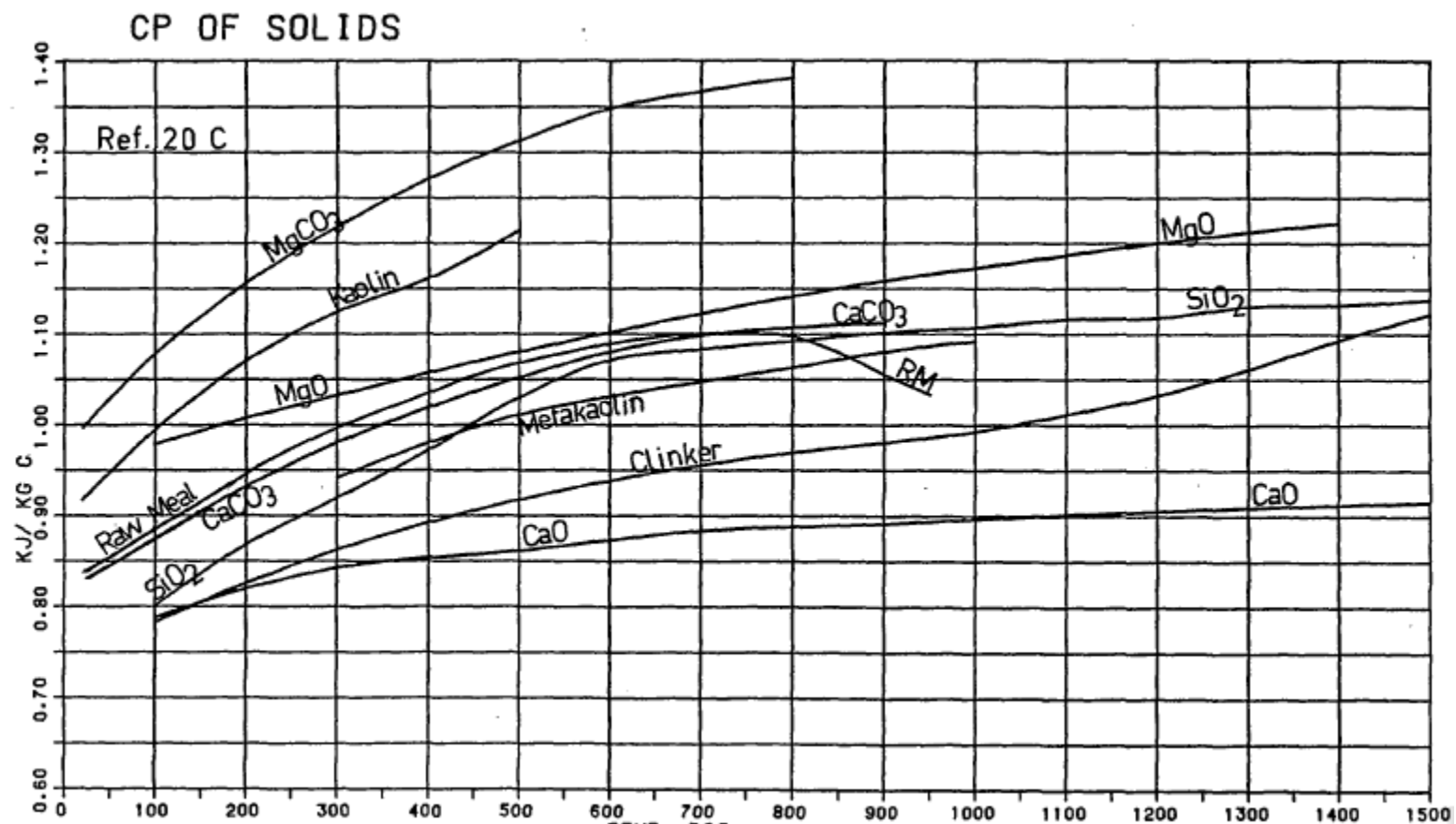
XXVI. Separador “Consulta_gasto_tempo” do Arrefecedor 7 do Ficheiro Excel Proposto



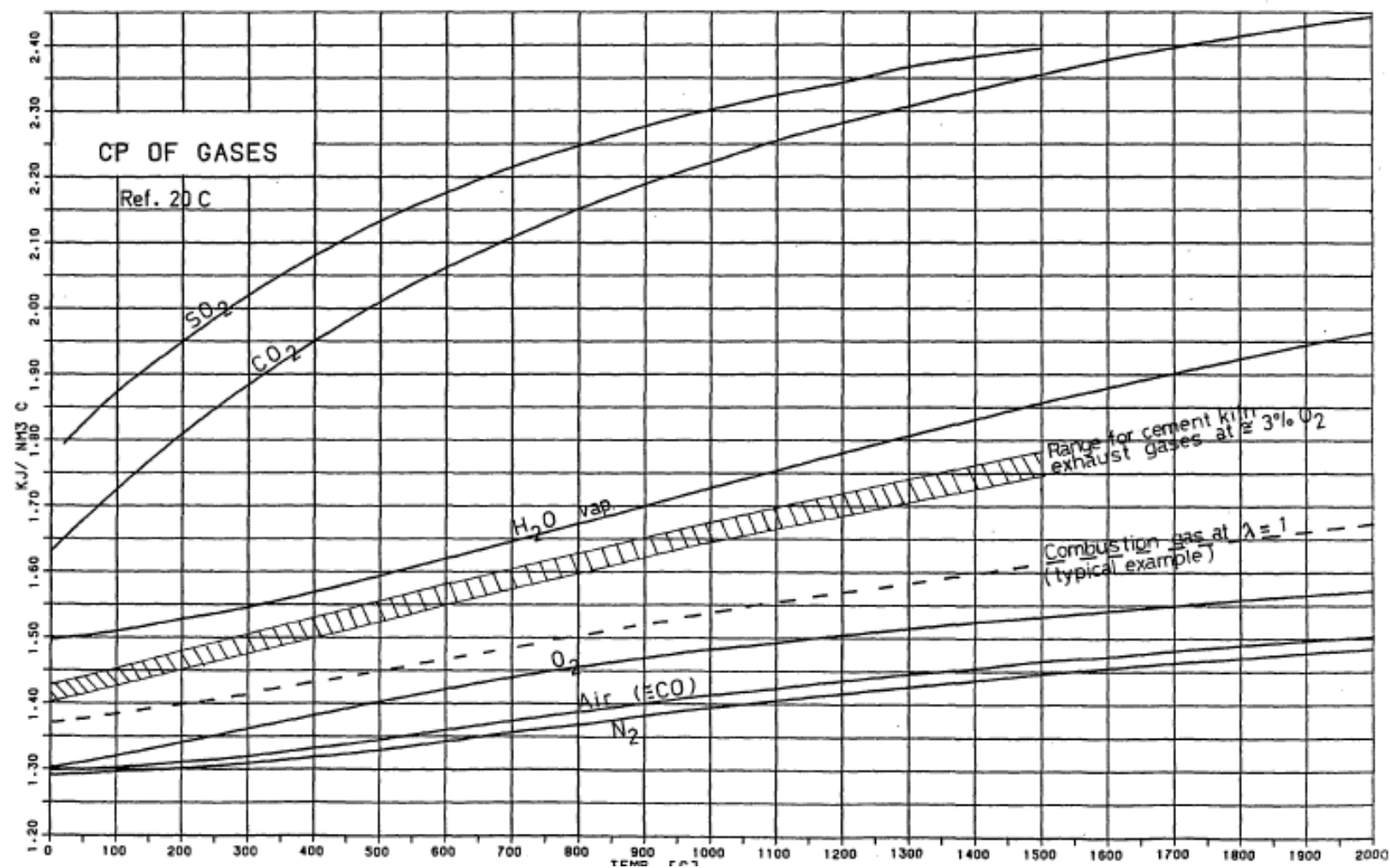
The figure consists of two empty 30x10 grids. The left grid is labeled 'Grelha 2' and the right grid is labeled 'Grelha 1'. Both grids have columns numbered 1 to 30 at the top. The grids are intended for data entry, with the right grid (Grelha 1) showing a small cluster of red cells in the bottom right corner, possibly indicating a specific data point or pattern.

Soma de gasto no tempo:	
De:	Até:
01/01/2015	30/08/2015

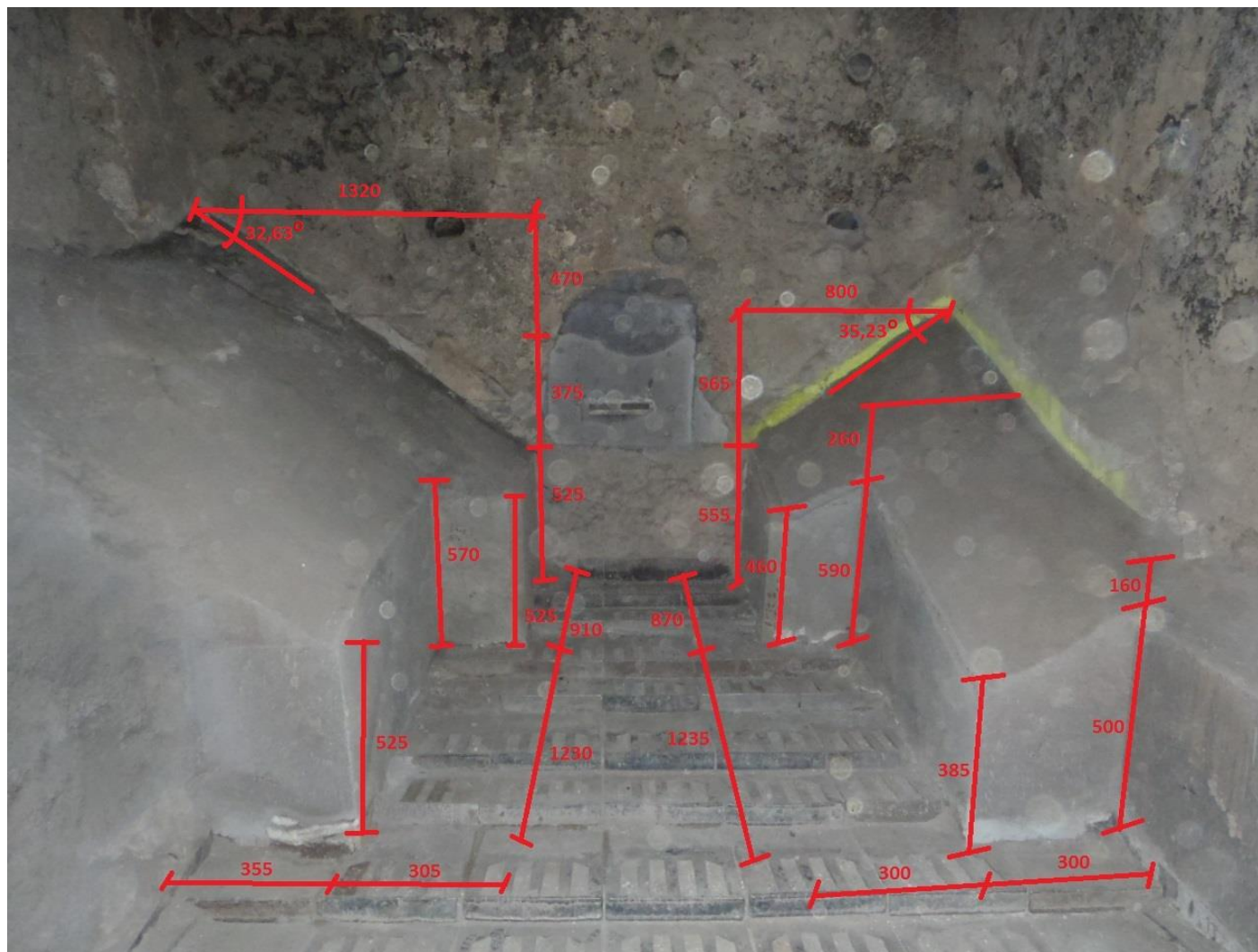
XXVII. Calor Específico do Clínquer [14]



XXVIII. Calor Específico de Gases [14]

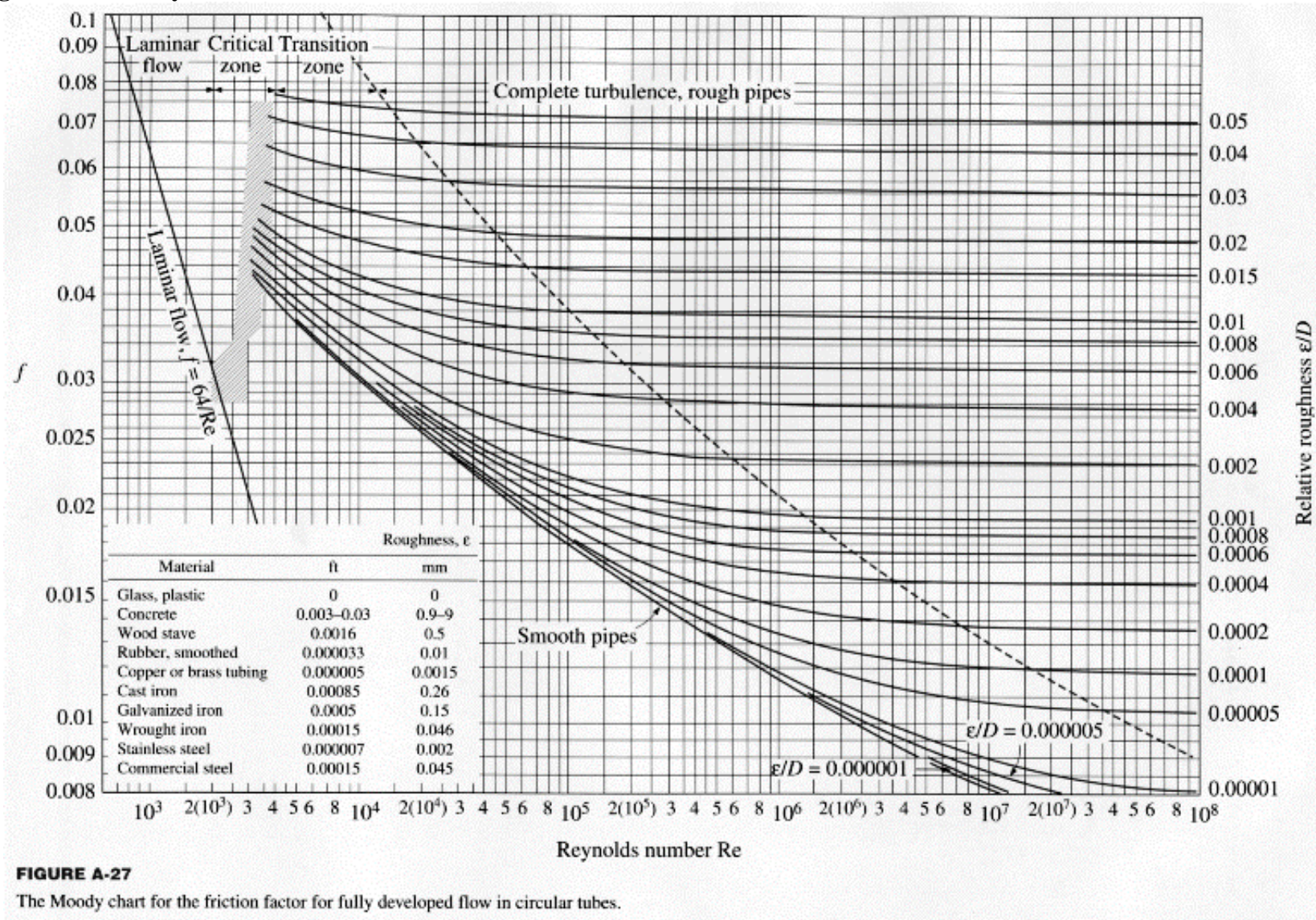


XXIX. Croqui do Altar do Arrefecedor da Linha 5



XXX. Esquema de Principio do Sistema de Injeção de Água

XXXI. Diagrama de Moody



XXXII. Curvas da Bomba Seleccionada para o Sistema de Injeção de Água

